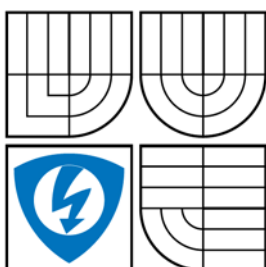


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ŠIROKOPÁSMOVÉ METODY PRENOSU DAT PO ENERGETICKÝCH SÍTÍCH

WIDEBAND METHODS OF DATA TRANSMISSION OVER POWER NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

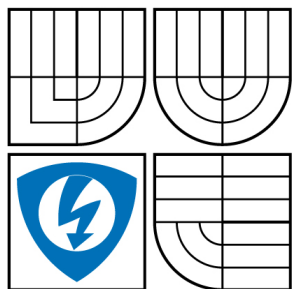
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVEL SVOBODA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. VÁCLAV ZEMAN, Ph.D.

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Svoboda Pavel Bc.

ID: 89365

Ročník: 2

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Širokopásmové metody přenosu dat po energetických sítích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte a popište technologii určenou pro vysokorychlostní datovou komunikaci po energetické síti. Zaměřte se především na širokopásmové systémy komunikující po rozvodech nízkého napětí. Navrhněte laboratorní síť umožňující provádět zkušební měření a demonstraci tohoto způsobu komunikace. Navrhněte sadu testů, které umožní zjišťovat přenosové parametry tohoto typu komunikace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Feibel, W. Encyklopedie počítačových sítí, Computer Press, 1996, ISBN 80-85896-67-2.
- [2] Kirwan, S., South, G. Power Line Networking Technologies Broadband Potential. Dostupné na <http://glasnost.itcarlow.ie/~net4/kirwans/bband.html>. 2003.

Termín zadání: 11.2.2008

Termín odevzdání: 28.5.2008

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Zeman, Ph.D.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Pavel Svoboda
Bytem: Rychnov na Moravě 39, 569 34
Narozen/a (datum a místo): 24.6.1984, Moravská Třebová

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Širokopásmové metody přenosu dat po energetických sítích

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Václav Zeman, Ph.D.

Ústav: Ústav telekomunikací

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v * :

- ☐ tištěné formě – počet exemplářů 2
- ☐ elektronické formě – počet exemplářů 2

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

Cílem této práce bylo prostudovat technologie určenou pro vysokorychlostní datovou komunikaci po energetické síti a provést sadu testů pro ověření teoretických vlastností technologie. V práci byly zkoumány především širokopásmové systémy komunikující po rozvodech nízkého napětí. Pro zjištění parametrů tohoto typu komunikace byla navržena laboratorní síť umožňující provádět řadu testů.

Poskytnutá zařízení byla popsána, uvedeny vlastnosti technologické specifikace a způsoby zapojení a způsoby jejich správy. Byla popsána správa, konfigurace a měření přes webové rozhraní na NMS zařízení a provedeno jednoduché rozčlenění do odpovídajících funkčních bloků odpovídající struktuře webových záložek.

Byla podrobně popsána metodika jednotlivých testů, které se opírají o dokumentaci „doporučení“ RFC a také o níže uvedené publikované práce. Dále byly popsány použité pomůcky při testech, jejich vlastnosti a ovládání. Byly sledována především propustnost a následné frekvenční závislosti odstupu signálu od šumu a počet bitů na nosnou.

Naměřené výsledky z jednotlivých testů byly mezi sebou srovnány a vyhodnoceny a bylo posouzeno, zda splňují požadovaná kritéria pro různé aplikace použití a posouzena vhodnost začlenění systému PLC do komunikačních sítí pro dosažení odpovídající QoS.

Metodiky testování a vybrané typy testů v tomto projektu jsou standardizovány a začleněny ve standartu ITU. Jednotlivé metodiky testů je možné srovnávat z hlediska jejich vypovídacího charakteru.

KLÍČOVÁ SLOVA

PLC technologie, přístupová technologie, domovní PLC síť, přenosový kanál, standard DS2, SNMP agent, autokonfigurace, testování výkonnosti, výkonnost na fyzické vrstvě, poměr signál/šum, počet bitů na nosnou

ABSTRACT

The aim of this work was to peruse and describe the high-speed data technology communicating over energy network. In this work was investigated broadband system communicating over low power distribution network. The laboratory network was designed for measuring parametres of this communication and performed set of tests.

Lended devices were described, properties of technology specification and methods of connection and management were introduced. Management, configuration and measuring over web interface on the NMS device was described and simple dividision into corresponding functional blocks corresponding to structure of web bookmaks was made.

Metodology of individual tests, grounded on documentation “recomandation” RFC and on introduced works, was elaboratly described. Used tools, their properties and managements were described. The transmission speed on application and physical layer were followed primarily, frequency dependencies on signal noise ratio and bits per carrier were followed secondary.

Measured results from individuals tests were compared among each other and evaulated. This observation leaded into decision on needed criteria for varius application. The suitaibility for integration into communication network for maintaining corresponding QoS was appreised.

Testing and chosen types of tests in this project were standardized and integrated into ITU standard. Individual tests are able to compare from the view of their testify charactestic.

KEYWORDS

PLC technology, access technology, in-home PLC network, transmission channel, DS2 standard, SNMP agent, autoconfiguration, throughput measurement, performance on physical layer, signal noise ratio, bits per carrier

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SVOBODA, P. *Širokopásmové metody přenosu dat po energetických sítích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 72 s.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Širokopásmové metody přenosu dat po energetických sítích jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Václavu Zemanovi, Ph.D., za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

.....

podpis autora

Seznam použitých zkratek

AES	(Advanced Encryption Standard) - pokročilý šifrovací standard
ARQ	(Automatic Request) - požadavek potvrzení
BPC	(Bits per Carrier) - počet bitů na nosnou
BPL	(Broadband PowerLine) - širokopásmová Powerline
BS	(Base Station) - základnová stanice
CENELEC	(European Committee for Electrotechnical Standardization) - evropská komise pro elektrotechnickou standardizaci
CFR	(Channel Frequency Response) - frekvenční odezva kanálu
CISPR	(Special International Committee on Radio Interference) - komise pro rádiové rušení
CPE	(Customer premises) - uživatelský zařízení
CSMA/CD	(Carrier Sense Multiple Access) - vícenásobný přístup k médiu
CU	(Coupling Units) - propojovací prvky
DHCP	(Dynamic Host Configuration Protocol) - protokol pro přidělování IP adres
DS2	(Design of Systems on Silicon S.A.) - návrh systému na Silikonové bázy
DSL	(Digital Subscriber Line) - digitální zákaznická přípojka
DSS	(Digital Spread Spectrum) - modulace s rozprostřeným spektrem
FCC	(Federal Communications Commission) - národní telekomunikační úřad
FEC	(Forward Error Correction) - zabezpečení proti chybám
G.711	(ITU-T standard for VoIP) - ITU-T standard pro VoIP
GMSK	(Gaussian Minimum Shift Keying) - modulace založená na gaussiovském klíčování
HE	(Head End) - uživatelské zařízení provádějící injektáž signálu
LAN	(Local Area Network) - lokální síť
LLC	(Logical Link Control) - podsíť logických spojů
LNA	(Low Noise Amplifier) - zesilovač s nízkým šumem
MAC	(Media Access Control) - podsíť přístupu k médiu
MIB	(Management Information Base) - datová jednotka pro řízení zařízení
MOS	(Mean Opinion Score) - střední rozhodovací hodnocení
MPLS	(Multi Protocol Label Switching) - protokol na přepínání paketů a okruhů
NMS	(Network Management System) - řídicí stanice ovládající PLC zařízení
OFDM	(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) - ortogonální frekvenčně dělený multiplex
OPERA	(Open PLC Research Alliance) - otevřené seskupení pro výzkum PLC
PESQ	(Perceptual Speech Quality Measure) - algoritmus pro měření kvality zvuku
PGA	(Programmable Gate Array) - programovatelné logické pole
PLC	(PowerLine Communication) - komunikace po energetické síti
PLC	(Packet Loss Concealment) - zakrytí ztracených paketů
PSD	(Power Spectral Density) - výkonová spektrální hustota
QoS	(Quality of Services) - kvalita služeb
RADIUS	(Remote Authentication Dial In User Service) - služba pro autentifikaci zařízení a jejich konfiguraci
REP	(Repeater) - opakovač

RFC	(Request for Comments) - dokument popisující metody měření
SDH	(Synchronous Digital Hierarchy) - synchronní digitální hierarchie
SNMP	(Simple Network Management Protocol) - protokol pro správu sítě
SNR	(Signal Noise Ration) - poměr signál/šum
STP	(Spanning Tree Protocol) - protokol pro zamezení vytváření smyček
TFTP	(Trivial File Transfer Protocol) - zjednodušený protokol pro přenos dat
USB	(Universal Serial Bus) - universální seriová sběrnice
VLAN	(Virtual Local Area Network) - virtuální lokální síť
VoIP	(Voice over IP) - přenos zvuku po IP sítích
WAN	(Wide Area Network) - rozsáhlá síť
WLL	(Wireless Local Loop) - bezdrátová síť pro překlenutí hluchých míst

Seznam použitých symbolů

$h(\tau, t)$	impulsní odezva kanálu
$re^{j\theta_i}$	komplexní odrazový faktor
$e^{-\alpha l_i}$	ztráta šířením
l_i	délka trasy
γ	míra přenosu
α	měrný útlum
β	měrná fáze
τ	zpoždění na trase
v	skupinová rychlost
ω	úhlová rychlost
Z_0	charakteristická impedance
x_k	trénovací sekvence
$R_{xx,n}$	fourierova transformace autokorelační funkce vstupního signálu
$\hat{\sigma}_n^2$	odhadovaný rozdíl L vzorků šumu
B_t	celková šířka pásma
N	počet širokopásmových nosných
Δf	frekvenční rozsah nosné
k_{priv}^i	soukromý klíč
k_{pub}^i	veřejný klíč
P_z	počet zaslaných rámců
P_p	počet přijatých rámců
Z	ztrátovost
C	propustnost
D	zpoždění
w	velikost okna

Obsah

1.	Úvod.....	11
2.	Technologie PLC	12
2.1	Historický vývoj technologií PLC	12
2.2	Úzkopásmové technologie	13
2.3	Přístupová, širokopásmová technologie.....	13
2.4	Domovní širokopásmové PLC sítě	14
3.	Analytický rozbor technologie přístupu k médiu.....	17
3.1	Vícecestné šíření v médiu	17
3.2	Ortogonální frekvenčně dělený multiplex	18
4.	PLC modemy DS2	21
4.1	Popis technologie	21
4.2	Struktura sítě	22
4.3	Struktura a funkce PLC DS2.....	23
4.3.1	Fyzická vrstva	25
4.3.2	Vrstva přístupu k médiu.....	26
4.3.3	Vrstva řízení toku a opravy chyb	27
4.3.4	Vrstva konvergence	28
4.3.5	Řídicí vrstva	28
4.3.6	Šifrování a integrita dat.....	29
5.	Konfigurace DS2	31
5.1	Webové rozhraní NMS	31
5.2	Architektura PLC NMS	35
6.	Metodika testování.....	39
6.1	Návrh laboratorní sítě	40
6.2	Vyhodnocení propustnosti	42
6.3	Vyhodnocení dlouhodobé propustnosti	44
6.3.1	Poloviční duplex	44
6.3.2	Plný duplex	44
6.4	Měření zpoždění.....	45
6.4.1	Realizace měření zpoždění	46
6.5	Monitorování PLC kanálu.....	46
6.6	VoIP přes PLC	48

7.	Získaná data z provedených testů	50
7.1	Vyhodnocení propustnosti různých zařízení.....	51
7.1.1	Dlouhodobá propustnost	52
7.2	Vyhodnocení zpoždění, jitteru a ztrátovosti	58
7.3	Vyhodnocení monitorování kanálu.....	60
7.4	Vyhodnocení internetové telefonie	66
8.	Závěr	68
9.	Použitá literatura	70
10.	Seznam obrázků.....	72
11.	Seznam tabulek	73

1. Úvod

Přístupové sítě implementují propojení koncového účastníka k síti, která spojuje geograficky rozlehlou oblast. Přístupové sítě tak umožňují velkému množství uživatelů použít různé telekomunikační služby. Možnou volbou pro realizaci přístupových sítí je použití technologie přenosu dat po energetické síti označované jako PLC (PowerLine Communications), která využívá stávajících přenosových prostředků.

PLC technologie umožňuje použití rozvodných napájecích sítí pro komunikační účely a v současnosti i pro širokopásmové komunikační služby. Základním důvodem k realizaci sítí tohoto typu je redukce nákladů na provoz a nabídku nových telekomunikačních služeb. Technologie PLC může být použita ke komunikaci v rámci budovy označované jako indoor PLC a na outdoor PLC, pro řízenou a zabezpečenou distribuci dat v rámci lokality zahrnující i více koncových účastníků. PLC systémy mohou být rozděleny na úzkopásmové PLC umožňující komunikaci s relativně nízkou přenosovou rychlostí (do 100 kb/s) a širokopásmové PLC systémy umožňující přenosy o rychlostech přesahující 3 Mbit/s pro provádění několika typických služeb.

Širokopásmové PLC technologie v sítích nízkého napětí se zdají být výhodným řešením pro tzv. poslední míly komunikačních sítí. Řešení systémů pro přístup k internetu od poskytovatelů pomocí technologie PLC se také označuje jako technologie BPL (Broadband over power lines). BPL je použití technologie PLC poskytující širokopásmový přístup k internetu za použití standardních energetických vodičů.

Zaměření této práce je na širokopásmové metody přenosu dat po energetických sítích. Jedná se především o prostudování a popis technologie určené pro vysokorychlostní datovou komunikaci po energetické síti. Práce se zaměřuje především na širokopásmové systémy komunikující po rozvodech nízkého napětí.

Pro testování různých přenosových vlastností a charakteru komunikace byl zvolen standard DS2. V rámci práce je popsána struktura a funkce zařízení pracující na tomto standardu, následně je dostupné zařízení a ovládání podrobně zdokumentováno a vypracována metodika měření pro zjištění parametrů komunikace. Následné měření utváří konečnou představu o této technologii.

2. Technologie PLC

PowerLine Communication, nebo-li PLC je obecná zkratka označující přenos dat po elektrické síti. V souvislosti s problematikou využívání elektrické sítě pro přenos dat byl zaveden také další pojem - BPL (*Broadband over Powerline*). BPL je také známé jako technologie, která poskytuje širokopásmový internet přes klasickou energetickou síť. Dalším možným využitím je propojení domácích počítačů a vnějších zařízení. Tato technologie je označována jako In-home PLC.

2.1 Historický vývoj technologií PLC

Komunikace po energetických sítích byla známá již od začátku dvacátého století. První systém s přenosem nosné byl podle [3] použit na síti vysokého napětí k překlenutí vzdálenosti 500 km. Takové systémy byly použity pro interní komunikaci, vzdálené měření a ke zpracování kontrolních úloh. Elektrické sítě v domovních zástavbách byly nejčastěji použity pro různé automatizované úlohy.

Vlastní technologie PLC a její vývoj začal před 25 lety. V této době byly lokální sítě (LAN) ve vývoji a veškeré propojení bylo řešeno přes paralelní a sériové porty. Tyto rozhraní umožňovaly připojení tiskárny nebo plotteru, ale jen jediný počítač mohl přistupovat k těmto zařízením, zařízení nebylo možné sdílet. Logickým řešením začalo proto být propojení přes elektrické vedení, které bylo představeno začátkem osmdesátých let. Takové zařízení se skládalo z vidlice zapojované do elektrické sítě, která byla připojena přes sériový port do počítače. Zařízení se skládalo z frekvenčního modulátoru a demodulátoru. Použitím rádiových frekvencí tak byla digitální data přenášena do další vidlice s podobným vybavením. Tento produkt vyrobený koncem sedmdesátých let nedosáhl úspěchu. Důvodem byla nepříliš zanedbatelná velikost zařízení a nízká přenosová rychlost.

Nízká přenosová rychlost byla ovlivněna rychlostí přenosu sériového portu, která měla rychlost 19200 b/s v 70. letech a 115000 b/s v letech osmdesátých. Dosažením pokroku v mikroelektronice a vývojem rozhraní USB byla obnovena snaha o připojení sítí k elektrické síti. Tyto pokroky vedly k vývoji miniaturizovaných a vysokorychlostních zařízení poskytujících propojení ethernetu přes elektrickou síť.

Technologie přenosu dat po elektrické síti prošla za posledních 10 let rozsáhlým vývojem, především u nejrůznějších výrobců čipů nebo aktivních prvků. Nejznámější a nejrozšířenější PowerLine technologií je Homeplug 1.0 postavená na čipu Intellon, technologie, která byla vývojově jednou z prvních na trhu. Technologie Homeplug je velmi jednoduše instalovatelná - uživatel pouze připojí v místech potřeby (v rámci bytu, kanceláře, objektu...) tzv. Homeplugy (adaptéry) do elektrické zásuvky a v optimálním

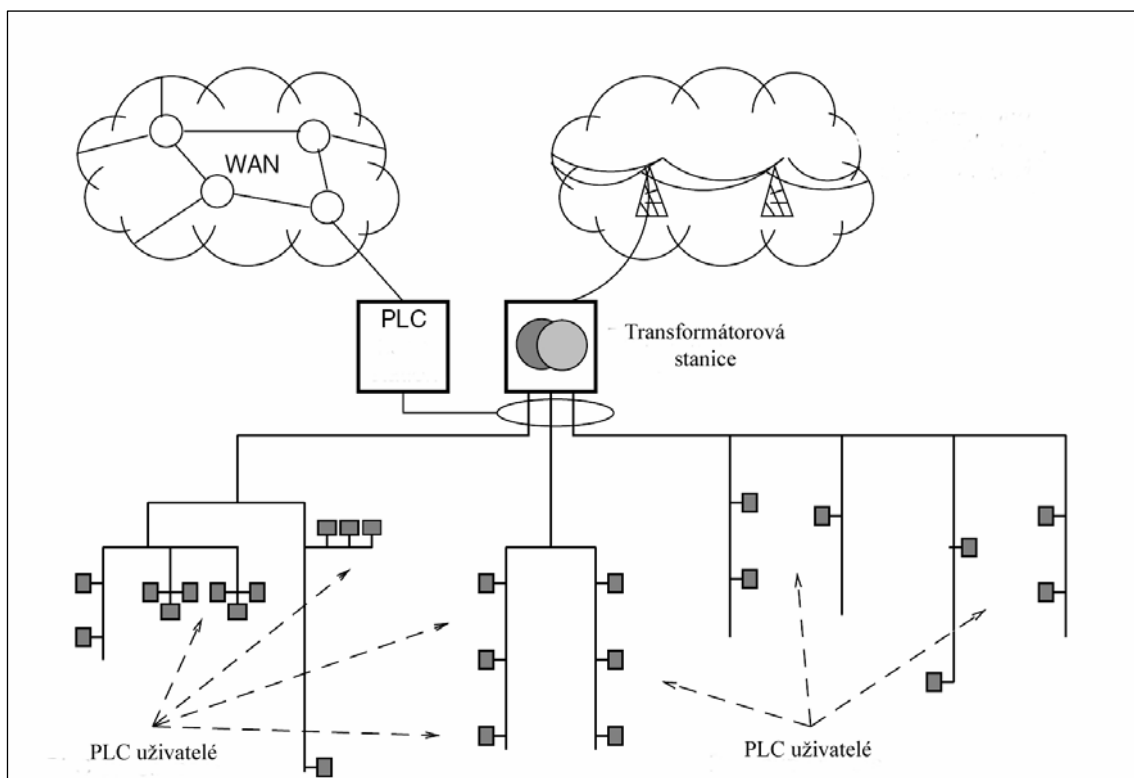
případě má tak okamžitě k dispozici malou lokální síť. Je velký rozdíl mezi propojením dvou kanceláří, za účelem retranslace internetu, a mezi zapojením garantované vysokorychlostní PLC sítě v celé budově, umožňující provoz služeb (IP video, hlas, internet, VPN) - takovou síť je možné vytvořit technologií DefiDev/DS2 [11].

2.2 Úzkopásmové technologie

Úzkopásmové přenosy po energetických sítích nízkého napětí se začaly objevovat brzo po širokém rozšíření energetických rozvodů. V roce 1930 byl představen signalizační protokol pro napětí vysoké (10-20 kV) a napětí nízké (230/400 V). Následuje dlouhý výzkum na výhodný způsob obousměrné technologie pro aplikace jakým je dálkové odečítání. Ve většině případů se této technologii užívá pro ovládání a kontrolu průmyslových zařízení.

2.3 Přístupová, širokopásmová technologie

Přístupové sítě (BPL) používají jako infrastrukturu rozvodných energetických sítí. Jedná se o lokální síť (LAN), protože všechna komunikace je posílána na každou stanici, která je fyzicky připojena k síti. Podobně jako u sítě LAN, jedině stanice s odpovídající cílovou adresou rámce putujícím po elektrické okruhu může tento rámec přečíst. Ve většině případů je tedy použita přístupová metoda CSMA/CD. Největším problémem současných energetických přístupových sítí je přenos signálu přes transformátory. Transformátor, zařízení které bylo navrhováno k propouštění frekvence 50 Hz a snížení napětí pro použití v domovech se pro signál jeví jako rozpojený obvod a zásadně ovlivňuje přenos signálu. Pro překonání těchto bodů na síti lze použít zařízení pracující s bezdrátovými technologiemi, které jsou umístěny v strategických místech.[3]



Obr. 2.1: Ilustrativní struktura sítě PLC

Pro zapojení koncových účastníků do sítě je použito sítě nízkého napětí, která se skládá z transformátoru a velkého počtu napájecích kabelů propojujících koncové uživatele. Přístupové sítě jsou připojeny k páteřní komunikační síti pomocí HE stanice obvykle umístěné v místě transformační stanice. Komunikační signál je následně přeměněn do formy kterou je možné přenášet po sítích nízkého napětí.

Uživatelé PLC jsou připojeni do sítě pomocí PLC modemu, který je připojený do elektrické zásuvky v domovním rozvodu. V domě je následně komunikace realizována separátní komunikační sítí nebo interní elektrickou instalací (in-home PLC). V tomto případě mohou být všechna zařízení připojena k PLC přístupové síti.

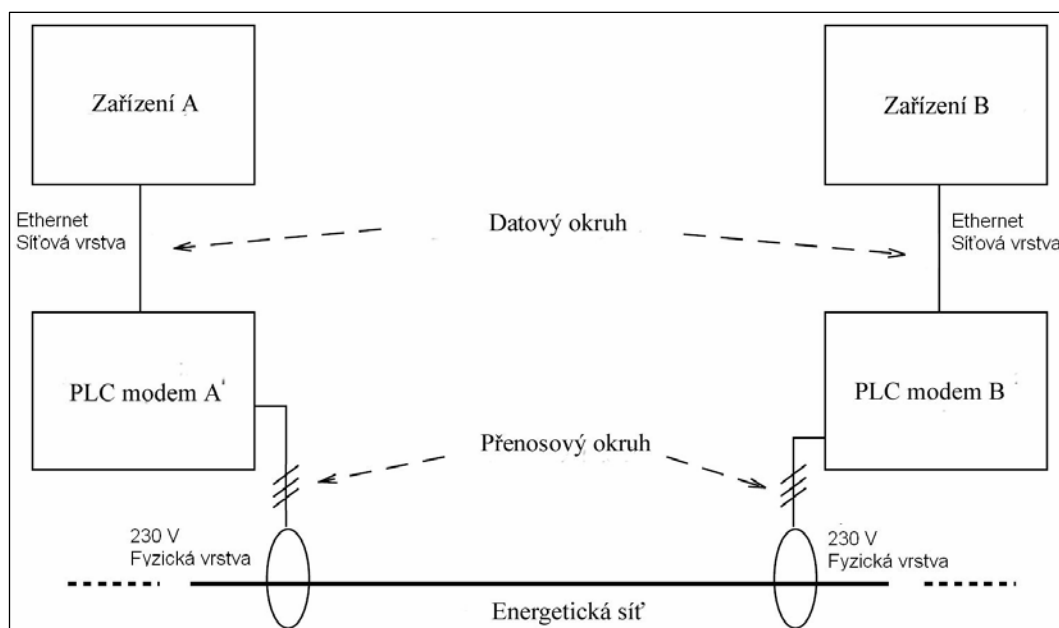
2.4 Domovní širokopásmové PLC sítě

Domovní PLC systémy podle [4] používají interní elektrickou infrastruktury jako přenosové médium. Tato síť propojuje typické zařízení v domech – telefony, počítače, tiskárny, videa atd. Dalším použitím těchto sítí jsou služby, jako vytvoření okruhu pro zaznamenávání bezpečnostních kamer, kontrola topení a světel, ovládání a odběr dat ze senzorů atd.

Struktura domovních (in-home) PLC systémů není rozdílná od přístupových (access) systémů. I zde je BS station která kontroluje PLC síť a případně připojuje ostatní vnější zařízení. Všechna zařízení jsou připojena přes PLC modem tak jako u přístupových sítích PLC. Domovní systémy nemusí být připojeny jen k přístupové PLC ale i k dalším přístupovým technologiím.

Pro dosažení konektivity jsou potřebné základní prvky. Základní úlohou je příprava signálu a konverze a příprava na přenos přes energetickou síť. V každé síti se tak nachází PLC modem a PLC HE statice. PLC modem připojuje standardní komunikační zařízení uživatele k energetickému médiu. Uživatelské rozhraní pak může nabízet různé standardy (RJ45, USB) pro přenos dat. PLC modem je tak připojen k napájecí síti použitím technologie která umožňuje vysílání signál a jeho příjem z elektrického vedení. Propojení má zajišťovat bezpečné galvanické oddělení a slouží jako high pass filter, který získává komunikační signál z frekvencí nad 9 kHz.

PLC Base station připojuje přístupovou síť do páteřní sítě. Realizuje propojení mezi páteřní komunikační sítí a energetickou sítí. Base station nepřipojuje individuální uživatelská zařízení, ale poskytuje mnoho druhů komunikačních rozhraní, jakým je xDSL, SDH, WLL. Base station kontroluje procesy na PLC přístupové síti.



Obr. 2.2: Obecná struktura komunikačního rozhraní

Protože sítě pro přenos energie nejsou navrženy pro přenos dat nejsou ani napájecí vodiče tím nejvhodnějším médiem. Z toho důvodu je přenos na PLC kanálu charakteristický velkými a na frekvenci závislými odrazy, změnami impedance, velkým

útlumem a nezanedbatelnými rušivými vlivy. Různé rušivé efekty vznikající z připojování zařízení na síť.

Útlum v PLC sítích závisí na délce a mění se charakteristické impedanci přenosového média. Mnoho měření [4] dokazuje, že útlum v energetických sítích je přijatelný jen do délky 200-300 m. U rozsáhlejších sítí je nutné dodat opakovač. Sítě nízkého napětí, které jsou použity pro přístupovou technologii PLC se chovají jako antény produkující elektromagnetické vyzařování. K zajištění vhodné přenosové rychlosti proto modemy používají frekvenční pásmo až do 34 MHz. Tento frekvenční rozsah je rezervován pro různé rádiové služby a PLC systém je může rušit. Byla proto vytvořena regulační limity pro elektromagnetické vyzařování, které je povoleno a definováno standardem CENELEC.

Z důvodu nízkého signálního výkonu jsou PLC sítě citlivé na rušivé vlivy a nejsou schopny přemostit delší vzdálenosti aby zajistily dostatečnou přenosovou kapacitu. Rušení je způsobeno ostatními službami (jako je krátkovlnné rádio) operující na frekvencích pod 34 MHz. Dále jsou to rušení přímo z energetické sítě jakými jsou elektromotory, které mohou být připojeny k síti nízkého napětí, televize a různé impulsy pocházející ze sítě.

Pro odstranění chyb je použit FEC a ARQ. Forward Error connection (FEC) obnoví data i poté co je originální zpráva ovlivněna rušením, ale vyžaduje část přenosové kapacity. Použití ARQ (Automatic Repeat reQuest) provádí přenos jen poškozených dat. Pro přenos dat na kanálu, na kterém se vyskytují odrazy, impulsních šumy a superpozice šumů se používá DSS a OFDM technologie. Technologie rozprostřeného spektra DSS redukuje problém. Jejimi vlastnostmi je nízká spektrální účinnost a charakteristika odpovídající dolní propusti.

3. Analytický rozbor technologie přístupu k médiu

Pro definovanou technologii lze nalézt určité základní charakteristiky. Mezi základní problém přenosu po elektrických sítích patří vícecestné šíření. Vícecestné šíření signálu je dle [12] v médiu způsobeno odrazy na nespojitých částech přenosové cesty. Takové nespojitosti vznikají následkem existence zátěží na koncích vedení a křížením jednotlivých kabelů.

3.1 Vícecestné šíření v médiu

Analytické výpočty vícecestného šíření se provádějí pro topologické struktury nevytvářející smyčky. Vlastní výpočet vícecestného šíření může být rozdělen do několika dílčích oblastí na útlum v kabelu, odrazy a přenosové koeficienty. Následně lze uvažovat L různých cest mezi dvěma komunikujícími zařízeními. V tomto případě může být impulsní odezva kanálu vypočtena jako suma přijatých signálů.

$$h(\tau, t) = \sum_{i=1}^L \{r_i \cdot e^{j\theta} \cdot e^{-\alpha l_i} \cdot \delta(t - \tau_i)\} \quad (3.1)$$

V tomto vztahu je $re^{j\theta_i}$ komplexní odrazový faktor pro trasu i , $e^{-\alpha l_i}$ je ztráta šířením, která závisí na délce trasy l_i . Dále se definuje míra přenosu jako $\gamma = \alpha + j \cdot \beta$ a zpoždění na trase $\tau = l_i / v$, založené na skupinové rychlosti $v = \omega / B$. Odrazový faktor je tedy součin všech odrazových a přenosových koeficientů na trase i .

Domovní elektrická síť může být popsána použitím tří parametrů ukončovací impedancí, typem sekčního vedení a délkou. Pro každý kabel tak může být změřena nebo vypočtena pomocí přenosových rovnic charakteristická impedance Z_0 a míra přenosu γ . Následně mohou být vytvořeny matice popisující ukončovací body a uzly, jejich spojení, délku a charakteristiku kabelu (Z_0 a γ).

S následnými výpočty pracuje zařízení, které injektuje signál do elektrické sítě. Zařízení musí mít tedy dostatečný výpočetní výkon pro modelování, zpracování signálu, trénování kanálu a alokaci šířky pásma. Toto zařízení pracuje se zmíněnými maticemi pro zjištění síťové topologie a inicializuje procedury, při kterých získává důležité informace o impedanci pomocí kontrolního kanálu.

Pokaždé když se změní impedance, zařízení které provádí injektáž přepočte odezvu kanálu. Po úvodním startu zařízení se zase provádí trénování kanálu. Během této procedury je vysílána sekvence do všech zařízení na síti. Každé zařízení používá přijatou sekvenci k výpočtu koeficientů, které popisují odezvu pro celé frekvenční

pásmo. Každé zařízení dále provádí výpočet úrovně SNR. Výsledky jsou následně zaslány injektážnímu zařízení pomocí kontrolního kanálu.

Pro nastavení zmíněných vlastností se pracuje s trénovací sekvencí x_k s periodou N která je rovna nebo větší hodnotě p_k . Za předpokladu použití X_n a P_n jako odpovídajících proměnných pro frekvenční doménu (n je frekvenční index) je možné výstup Y_n popsat jako

$$Y_n = X_n \cdot P_n + U_n \quad (3.2)$$

Při zmíněném popisu je u_k přídavný šum, který má ve frekvenční doméně ekvivalent v U_n . Trénování proces dále vyhodnocuje úroveň SNR pro definovaný kanál.

$$SNR_n = \frac{R_{xx,n} |\hat{P}_n|^2}{\hat{\sigma}_n^2} \quad (3.3)$$

Ve zmíněné vztahu je $R_{xx,n}$ fourierova transformace autokorelační funkce vstupního signálu, vyjadřující výkonové spektrum a $\hat{\sigma}_n^2$ je odhadovaný rozdíl L vzorků šumu. [12]

3.2 Ortogonální frekvenčně dělený multiplex

Elektrické sítě jsou charakteristické vícenásobnými odrazy stejně jako bezdrátové sítě. To je způsobeno existencí přechodů a křížení na různých délkách a dále také odpojováním zátěží. Z tohoto důvodu vznikají zpožděné vlny, které způsobují interference, které degradují výkonnost sítě. Je nutné eliminovat vliv takových vln, které interferují s žádaným signálem. Technologie, která odstraňuje vliv vícecestného šíření je modulační technika OFDM. OFDM je založena na paralelním širokopásmovém přenosu.

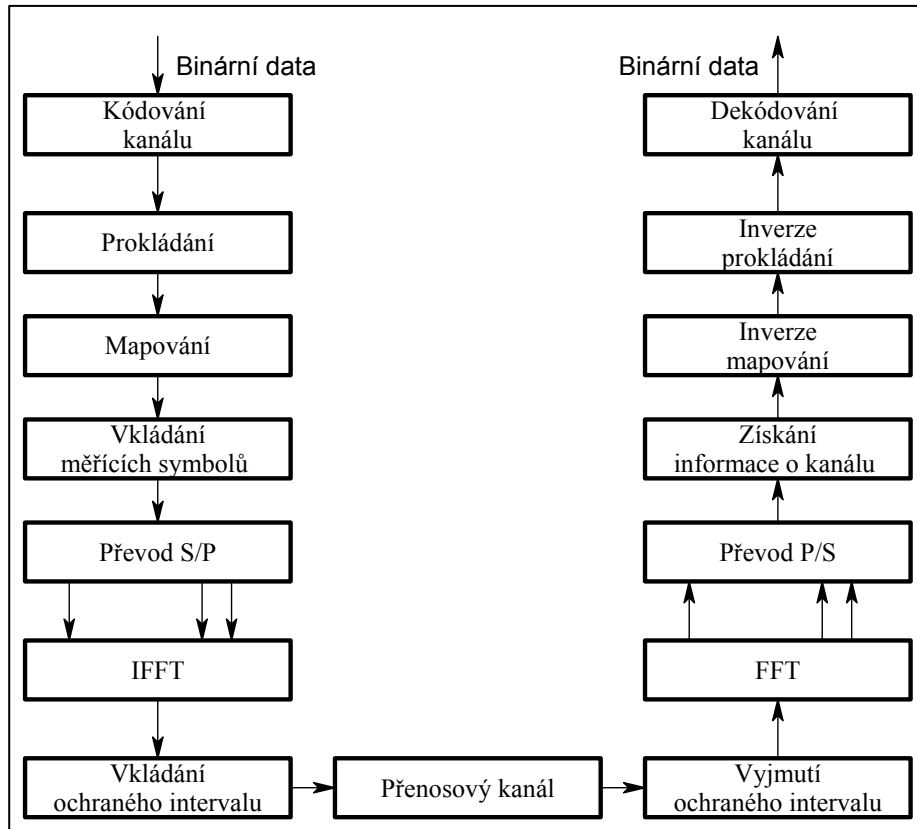
Schéma systému OFDM je naznačeno na obrázku. 3.1. Vysílač s daty provádí kódování, prokládání a mapování. Data jsou následně převáděna do paralelních kanálů. Zvětšováním počtu kanálů lze dosáhnout snížení přenosové rychlosti pro každý jednotlivý kanál. Přenášená data v každém kanále jsou modulována M stavovou klíčovací technikou PSK a následně modulovanou QAM. Následuje plnění obvodu pro inverzní FFT, který generuje OFDM signál. Signál je vysílán v nezávislých okamžicích pro omezení interferencí. Přijímací obvod následně získá poslaná data, aplikuje FFT a provádí převod z paralelních dat na sériová. Konečným krokem je demodulace a dekódování.

Pro zajištění oddělení frekvencí je nutné, aby byly odděleny o frekvenci $1/T$ Hz pro signál o periodě T . Tato podmínka zajišťuje, že se nebudou ovlivňovat jednotlivé nosné při detekci dat. U technologie OFDM je celá šířka pásma rozdělena do několika dílčích nosných. Každé nosné je přiděleno určité úzké pásmo. Následně je využito

frekvenční dělení (FDM) pro přenos paralelních datových toků. Tyto úzkopásmové přenosové kanály jsou odolné proti skupinovému zpoždění a frekvenčně závislému útlumu. Pokud je tedy celková šířka pásma B_t a celkový počet širokopásmových nosných N je frekvenční rozsah každé nosné Δf definován jako

$$\Delta f = \frac{B_t}{N} \quad (3.4)$$

Dále je možné odvodit pro jednotlivé nosné za pomoci střední frekvence f_c , spodní pásmové frekvence f_1 a frekvence vrcholu pásma f_2 následující vztahy.



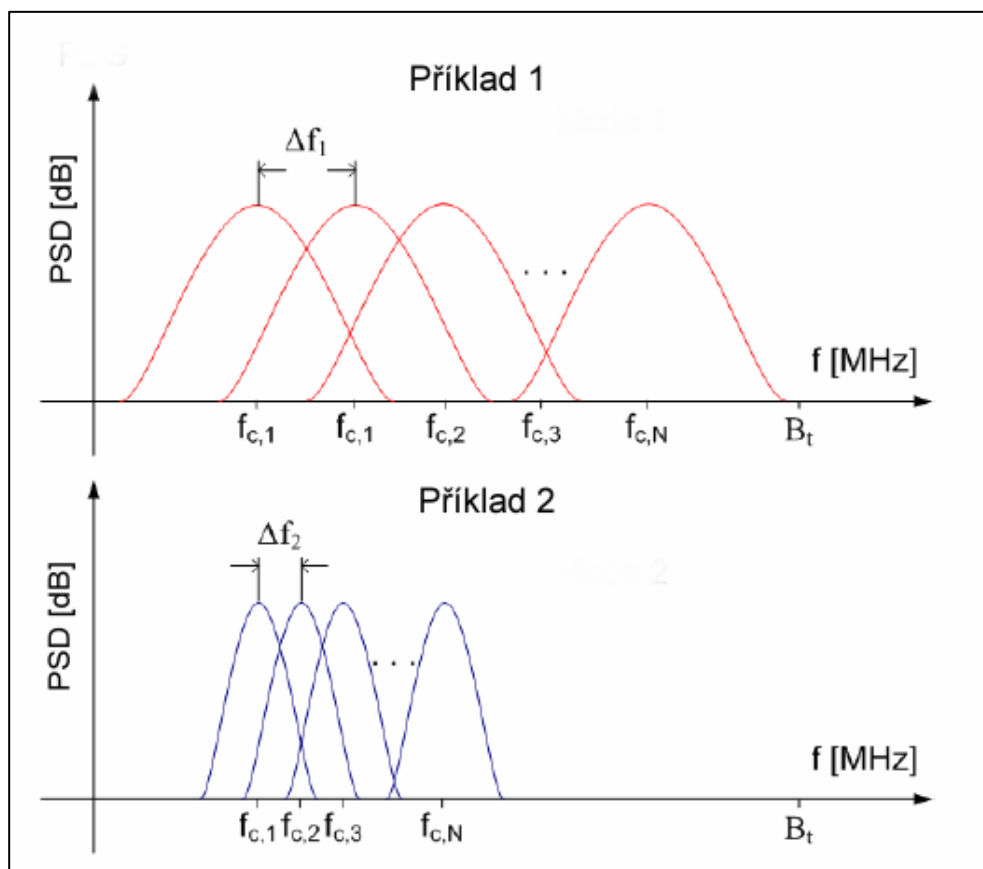
Obr. 3.1: Blokové schéma technologie OFDM

$$f_c = f_1 + \frac{1}{2} \Delta f \quad (3.5)$$

$$f_c = f_2 - \frac{1}{2} \Delta f \quad (3.6)$$

$$\Delta f = |f_2 - f_1| \quad (3.7)$$

Zmíněné vztahy je následně možné graficky interpretovat tak jak je to na obrázku 3.2, kde na vrchním obrázku je zobrazeno N jednotlivých nosných rozprostřených přes celou dostupnou šířku pásma. Spodní graf ilustruje situaci, kdy je stejný počet nosných rozprostřeno na části šířky pásma.



Obr. 3.2: Ilustrace technologie OFDM

OFDM u standardu DS2 používá 1536 dílčích nosných s modulační hustotou od jednoho do deseti bitů na nosnou. Důvodem zvolení právě tohoto rozsahu je z důvodu zajištění vysoké přesnosti a úzkých přestupů, které mají zanedbatelný dopad na sousední dílčí nosné.

Nejméně zarušená nosná s největším množstvím informace je označována jako HURTO a rezervována pro informace, které jsou kritické a k opravě systému. Jedná se o informace s hlavičkami datových bloků a kontrolní informace. Pro zajištění takového velké účinnosti je použito zabezpečení FEC, prokládání a odpovídajícím způsobem zvolená nadbytečnost. Tím je dosaženo toho, že na přijímací straně je informace správně demodulována i v nejhorších případech.

4. PLC modemy DS2

Vysokorychlostní PLC Defidev/DS2 je technologie přenosu informací po elektrickém vedení nízkého (220 V) nebo středního napětí (22 kV). Je primárně určena pro budování přístupových sítí – tzv. „poslední míle“. Pilířem technologie Defidev/DS2 je centrální zařízení HeadEnd (dále jen HE), který nezávisle komunikuje s koncovými PLC modemy (dále jen CPE). Tento systém je injektován cívkou na jednu z fází elektrické sítě v objektu. Signál se následně indukuje i na ostatní fáze. Maximální reálná vzdálenost mezi zařízeními se pohybuje mezi 200 – 300 m. Signál je ovšem možné libovolně opakovat zařízením Repeater (dále jen REP).

4.1 Popis technologie

U PLC technologie je datový signál modulován na kmitočty v řádech jednotek až desítek MHz a tento signál je injektován do elektrické přenosové sítě. PLC systém tedy tvoří modemy, které převádějí nejčastěji Ethernet (10Mb/s, 100Mb/s) na vysokofrekvenčně modulovaný signál superponovaný na síťové napětí 50Hz a zpět. Nejpoužívanější modulační systémy u PLC systémů jsou OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) – systémy DS2 a Corinex, GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) - systém ASCOM. Dosažitelná překlenutelná vzdálenost pomocí PLC se pohybuje v řádu jednotek až stovek metrů a přenosové rychlosti v řádech jednotek až desítek Mb/s. pro překlenutí delších vzdáleností se využívá opakováčů.

Z hlediska síťového tvoří sestava PLC zařízení v jednodušším případě „distribuovaný rozbočovač“, ve složitějším pak „distribuovaný most“. Zařízení prvního typu jsou vhodná pro propojení jednotlivých počítačů či subsítí v rámci budovy tzv. indoor aplikace, zatímco zařízení druhého typu lze již použít pro řízenou a zabezpečenou distribuci dat v rámci lokality zahrnující i více koncových účastníků a vytvořit plnohodnotnou přístupovou síť (tzv. outdoor aplikace PLC).

Všechna zařízení mají jedinečné IP adresy ze zvoleného rozsahu, které se jednotlivým zařízením (HE,CPE,REP) přidělují dynamicky, při instalaci, pomocí dalšího konfiguračního modulu - NMS Wi-Fi GW (dále jen NMS). NMS – Network Management System - je prakticky router s 1x WAN portem a 4x LAN porty, který obsahuje firewall, Wi-Fi rozhraní a nejdůležitější komponentu - systém pro konfiguraci PLC Defidev/DS2 sítě. Tímto zařízením se tedy celá PLC Defidev/DS2 síť konfiguruje a spravuje. Přidělené adresy je možné napevno uložit do paměti všech zařízení (HE, CPE, REP) bez nutnosti stálého připojení NMS. V případě výpadku elektrické energie se po obnovení dodávky elektrického proudu zařízení sama najdou, spojí, a obnoví komunikaci tak, jak již byla nakonfigurována NMS systémem.

Tato technologie podporuje nejrozumnější síťové vlastnosti jako (QoS, VLAN, interní VLAN, TELNET, SNMP, AES). Čipy DS2 se vyznačují, kromě výkonných síťových funkcí, také vylepšeným analogovým rozhraním. Jedná o zvýšení citlivosti vstupních obvodů, takže zařízení postavená na bázi těchto čipů jsou schopna dosahovat vyšších rychlostí na delší vzdálenosti, a to při snížení celkového emitovaného výkonu. Tím je také dáno splnění základních požadavků IEC (Mezinárodní elektrotechnická komise) v oblasti EMC (elektromagnetická kompatibilita) a také CISPR (mezinárodní výbor pro rádiovou interferenci v rámci IEC) na úroveň rušení, a to nejen rušení na elektrickém vedení, ale i rušení radiálního (radiová interference). Krom toho je čip DS2 zatím jediný PLC produkt, který umožňuje dálkově programovat tzv. výkonovou masku. Jedná se o určení maximálního výkonu každého nosného kmitočtu (celkem 1536 nosných v pásmu 3 – 34 MHz), čímž je umožněno v případě nutnosti utlumit vysílání v požadovaném kmitočtovém pásmu až k nule.

Tato možnost slouží k prevenci případné – byť z principu řešení velmi malé – interference se stávajícími i budoucími vyhrazenými frekvenčními pásmy (armáda, ambulance, policie, letecký provoz). Dalším splněným požadavkem je možnost vzdáleného odpojení (vypnutí) zařízení z elektrické sítě.

Tato technologie je certifikovaná pro použití v Evropské unii. Obecně je technologie PLC doporučena v rámci memoranda z roku 2005 pro členské země jako přelomová broadbandová technologie, umožňující velmi rychle připojit k internetu široké spektrum zákazníků. Výrobce čipů DS2 je partnerem více než 40 energetických společností na světě. Konkurencí výrobce zařízení Defidev je například Mitsubishi, Sumitomo, Schneider. PLC systém Defidev/DS2 je nejpokročilejší technologií na světovém trhu. Technické aspekty předurčují technologii Defidev/DS2 k masivnímu plošnému nasazení – rychlost, s jakou díky ní lze připojovat domy či objekty (se zákazníky), umožňuje zcela efektivní řešení otázky, jak ve velmi krátkém čase dosáhnout velmi širokého pokrytí, a to současně s ohledem na stále vzrůstající potřeby datových přenosů. Její přednosti ji rovněž přinášejí uplatnění v případech, kde nelze táhnout datový kabel. Nasazuje se však i ve zcela běžných případech potřeby tvorby datové sítě [5].

4.2 Struktura sítě

• Head-end

Zařízení propojující WAN síť s PLC přístupovou sítí na nízkonapětových elektrických rozvodech. Toto zařízení je zpravidla umístěno v trafostanici vn/nn nebo v rozvodné skříni uvnitř objektu. Konektivita (optika, satelit, wireless) je přivedena k místu

injektáže a Head-End převádí tento signál na elektrickou síť. Dosah PLC signálu je cca 200 m a lze jej libovolně opakovat zařízením Repeater.

- **Repeater**

Zařízení sloužící k zesílení (opakování) vysokofrekvenčního signálu. V zařízeních DS2 se uplatňuje časové sdílení pásma (příjem a vysílání probíhá na stejných frekvencích a střídá se v čase).

- **CPE**

Koncový uživatelský modem, zařízení pro zpětný převod vysokofrekvenčního signálu z elektrické sítě na Ethernet rozhraní (RJ45, 100Mbit Ethernet) a naopak. (Modem s označením ACPE-200 obsahuje oproti modemu AMH-200 navíc rozhraní RJ11 pro připojení standardního analogového telefonu (signál z telefonu je digitalizován a převeden na VoIP)). Pomocí těchto tří typů zařízení je budována hierarchická PLC síť s kořenovým Head-end zařízením, mezilehlými Repeatery (v několika úrovních) a koncovými CPE zařízeními v bytových jednotkách či kancelářích.

- **NMS**

Network Management System: systém pro konfiguraci, správu a sledování PLC sítě.

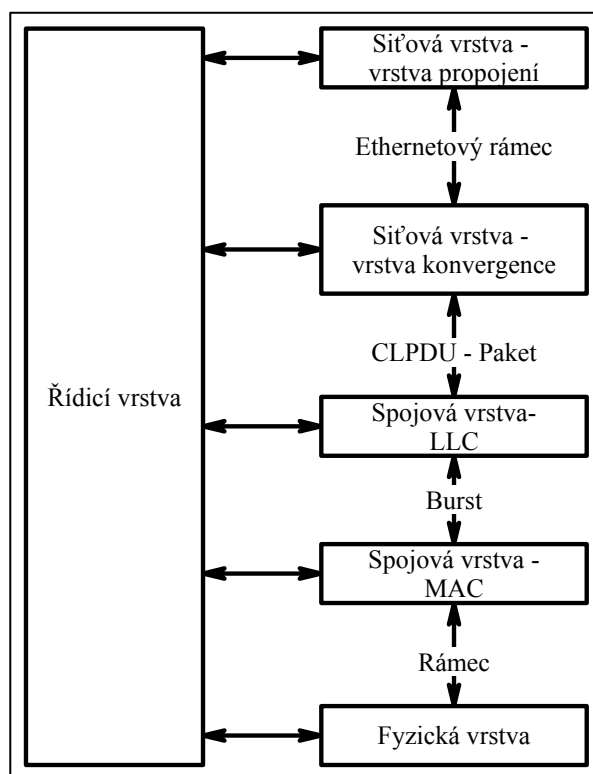
- **vazební členy (Coupling Units)**

Zařízení pro injektáž vysokofrekvenčního signálu, sloužící k přivedení vysokofrekvenční modulační na elektrický rozvod. Tyto členy se dělí na induktivní (dělená ferromagnetická či železná jádra tvořící vf transformátor) a kapacitní (malý vazební vysokonapěťový vf kondenzátor). Z hlediska použití jsou induktivní vazební členy nezastupitelné pro vn rozvody a nejpoužívanější pro připojení head-end zařízení na nn rozvod.

4.3 Struktura a funkce PLC DS2

Funkční struktura zařízení DS2 dle definovaného dokumentu [8] je specifikovaná organizací OPERA. Ta standardizuje funkce pro nejvyšší výkonnost a správu. Pro jednotlivé vrstvy definuje jejich vlastnosti a charakterizuje jak se má dané zařízení chovat. Organizace definuje tyto standardy na různých vrstvách a definuje tak vlastní referenční model.

- Fyzická vrstva
 - definuje fyzický přenosový formát,
 - rychlost až do 205 Mbit/s použitím modulace OFDM,
 - spektrální výkonnost do 8 bitů za sekundu,
 - proměnná šířka pásma a spektrálního umístění použitím 1536 nosných a vkládání jednoho do deseti bitů na nosnou,
 - možnost použití opakovačů založených na časovém a frekvenčním multiplexu pro dosažení plného pokrytí,
 - pružná maska pro zpracování PSD umožňující dynamické přecházení pásem a vzdálenou kontrolu z jakéhokoli umístění.
- Spojová vrstva – podvrstva přístupu k médiu (MAC layer)
 - definuje jak jsou využity síťové prostředky pro zajištění komunikace,
 - architektura Master-Slave (HE-CPE),
 - pružný mechanismus předávání oprávnění (Token pass), umožňující systému definovat různé topologie a typy provozu,
 - přenosový typ vysílání z bodu do více bodů (Point to Multipoint) velice vhodný pro stromovou hierarchickou síť.
- Spojová vrstva – podvrstva řízení (LLC layer)
 - definuje komunikace bez chyb mezi uzly,
 - upravený mechanismus ovládání potvrzení přijetí paketu (ACK).
- Síťová vrstva – podvrstva konvergence a řízení Quality of Services
 - definuje standardní protokoly 802.3 a jeho začlenění do systému a vlastní,
 - umožňuje garantovanou QoS,
 - CBR, VBR, ABR jsou definovány řízeny pomocí SNMP,
 - je definováno 8 různých tříd,
 - programované řízení zahlcení.
- Síťová vrstva – vrstva propojení (Bridging)
 - podpora protokolu IEEE 802.1D, IEEE 802.1D pro VLAN a IEEE 802.1Q pro VLAN.
- Řídicí vrstva – bezpečnostní mechanismy a řízení
 - definuje jak každá z vrstev je nastavena,
 - zabezpečení založené na protokolech 802.11i a 802.1X,
 - použití šifrovacího standardu AES-128 CCM,
 - ovládání zařízení pomocí SNMP a MIB.



Obr. 4.1: Vrstvový referenční model dle organizace OPERA

4.3.1 Fyzická vrstva

Fyzická vrstva je založena na ortogonálním frekvenčně děleném multiplexu (OFDM). OFDM bylo zvoleno jako modulace z důvodu nezávislosti na změně frekvenčního pásma, zarušení signálu a způsobu jakým se vyrovnává s impulsním šumem, čímž dosahuje vysokou spektrální účinnost.

Zřetězení čtyř dimenzionální Trellis kodové modulace (4D-TCM) a Reed-Solomonových kódů pro zajištění opravy chyb (Forward error correction) dovoluje překlenout problémy se zarušeným kanálem a zajišťuje nejvyšší výkonnost. Tyto mechanismy jsou doplněny o skramblování a prokládání dat pro dosažení dobrých přenosových vlastností s nízkou složitostí implementace.

Parametry modulace pro každý vysílač a přijímač jsou přizpůsobovány reálné situaci odpovídající kvalitě přenosového kanálu. Tato funkce je zajištěna měřením SNR v každé nosné. Vyhodnocením SNR je následně optimální modulace BPC a tím dosažena maximální přenosová rychlost.

Širokopásmová powerline využívá v některých geografických oblastech frekvence, které mohou být licencované k různým rádiovým službám, jakými jsou například frekvence pro amatérské rádio. Regulace v různých zemích proto mohou

nařizovat na kterých frekvencích může být použita powerline komunikace a na kterých je používání zakázáno.

Spektrální přeskok (notching) je technologie obvykle používaná pro vypuštění určitých pásem. Tyto přestupy jsou vytvořeny vypnutím určitých OFDM dílčích nosných a tím se eliminuje energie vysílaná v tomto pásmu.

4.3.2 Vrstva přístupu k médiu

Organizace OPERA specifikuje dle [7] pro zařízení PLC pokročilý dynamicky časově dělený multiplex (ADTDM), který je optimalizován pro distribuci zvuku a videa. ADTDM poskytuje bezkolizní přístup k přenosovému médiu pro všechny uzly v síti PLC v závislosti na rozdílných prioritách služeb, které mohou odpovídat různým typům aplikací (data, VoIP, video on demand atd.)

ADTDM kombinuje náhodný, sdílený mechanismus použitím distribuovaného, hierarchického přístupového protokolu. Rozhodování přístupu k médiu je kontrolováno centralizovaným prvkem v síti, který se přizpůsobuje různé možnosti změně topologie zajišťující, že všechny přenosy odpovídají QoS.

Bezkolizní přístup zajišťuje QoS pro všechny klasické aplikace. Pro aplikace, které vyžadují mnohem sofistikovanější služby jakým je AMR (Adaptive Multi-Rate) pro kódování zvuku nebo služby, které vyžadují nízkou přenosovou rychlost je nutné použít jinou přístupovou metodu. U těchto služeb je uzel neaktivní a vysílá datové pakety v nederministických časových okamžicích a ve shlucích dat bez čekací doby. ADTDM není přizpůsoben takovým situacím, proto je použita metoda CSMA v paralele a tak poskytuje těmto uzlům mechanismus založený na kolizi a zpětném vyžádání dat.

Pro přístup k médiu je následně využit mechanismy umožňující vylepšení využití oprávnění k vysílání (token). Jedná se o tzv. Nevratný token, tento je vysílán z HE do dalších svých podřízených stanic (REP, CPE). Nevratný datový token indikuje na který uzel jsou data určena a jak dlouho je povoleno vysílat. Dalším mechanismus je tzv. Distribuční token. Tento token přenáší po přenosovém kanálu seznam uzlů pro které jsou data určena a jak dlouho je povolen přístup.

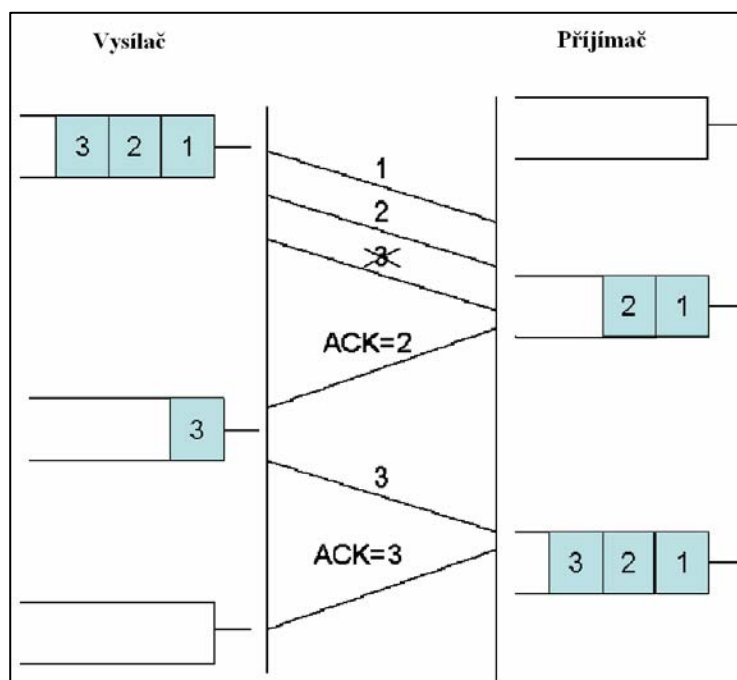
Z pohledu přístupu k médiu tak HE zařízení kontroluje přístup k přenosovému médiu dalších zařízení a zajišťuje správné přiřazení prostředků pro zajištění požadavků QoS. HE je odpovědný za generování tokenu a distribuci tohoto tokenu na ostatní zařízení v síti. Repeater je zařízení, které přijímá token od HE a přeposílá jej do ostatních zařízení, která jsou mimo dosah HE.

4.3.3 Vrstva řízení toku a opravy chyb

Tato vrstva zajišťuje komunikaci bez chyb, mezi jednotlivými uzly v PLC síti. To je provedeno kódováním dat na vrstvě konvergence, kdy se vytváří sekvence kódových slov. Tato kódová sekvence označovaná jako Burst, je přenášena mezi uzly použitím volitelného potvrzování. Burst je tvořen z hlavičky, následované daty obsahující jeden nebo několik fragmentovaných paketů. Hlavička je bez dat je použita k posílání ACK pokud nejsou žádná data k odeslání.

V zařízení je definováno posuvné okno a výběrový protokol pro přeposílání pro řízení spolehlivého přenosu ethernetových paketů. Každý ethernetový paket má identifikátor paketu. Komunikace začíná, když přijímač posílá potvrzení (ACK) o správně přijatých paketech a vyžaduje přeposílání nepřijmutých nebo porušených paketů. Komunikace probíhá podle následujícího schématu.

1. Nejdříve vysílá levý uzel sérii paketů s identifikačními čísly 1, 2 a 3 pravému uzlu.
Levý uzel nechává tyto pakety v přenosovém zásobníku v případě, že by bylo nutné je poslat znovu.
2. Z důvodu zarušeného kanálu je paket 3 porušen. Pakety 1 a 2 jsou přijaty v pořádku.
3. V dalším kroku pravý uzel posílá ACK levému uzlu, a tak potvrzuje pakety 1 a 2 a vyžaduje přeposlání paketu 3.
4. Levý uzel odstraní paket 1 a 2 z přenosového zásobníku a přepošle paket 3.
5. Nyní je paket 3 správně přijmut a pravý uzel posílá novou kontrolní zprávu potvrzující paket 3.
6. Po přijmutí ACK, levý uzel odstraní paket 3 z přenosového zásobníku.



Obr. 4.2: Schéma potvrzování paketů

4.3.4 Vrstva konvergence

Funkcí konvergenční vrstvy je balení paketů přicházející z externích aplikací (typicky 802.3 Ethernetové rámce) předtím než vstoupí do vrstvy LLC. Ethernetový rámec je zabalen do paketu PLC, který je obvykle tvořen Ethernetovým rámcem a hlavičkou PLC, která obsahuje informace jakými jsou prioritizace PLC, VLAN (rozšířená VLAN), informace důležité pro širokopásmové vysílání atd.

Správa VLAN umožňuje síti rozdělení do různých, nezávislých a izolovaných podsítí, které mohou být nezávisle spravovány. Pro zařízení PLC byl standard VLAN 802.1q rozšířen na VLAN, jež poskytuje dodatečné funkce potřebné pro správu zařízení komunikujících po elektrickém rozvodu.

4.3.5 Řídicí vrstva

Pro zařízení PLC je definován specifikovaný formát pro vyměňování kontrolních informací mezi uzly, který využívá SNAP balení pro klasické ethernetové rámce. Protokol má následující vlastnosti.

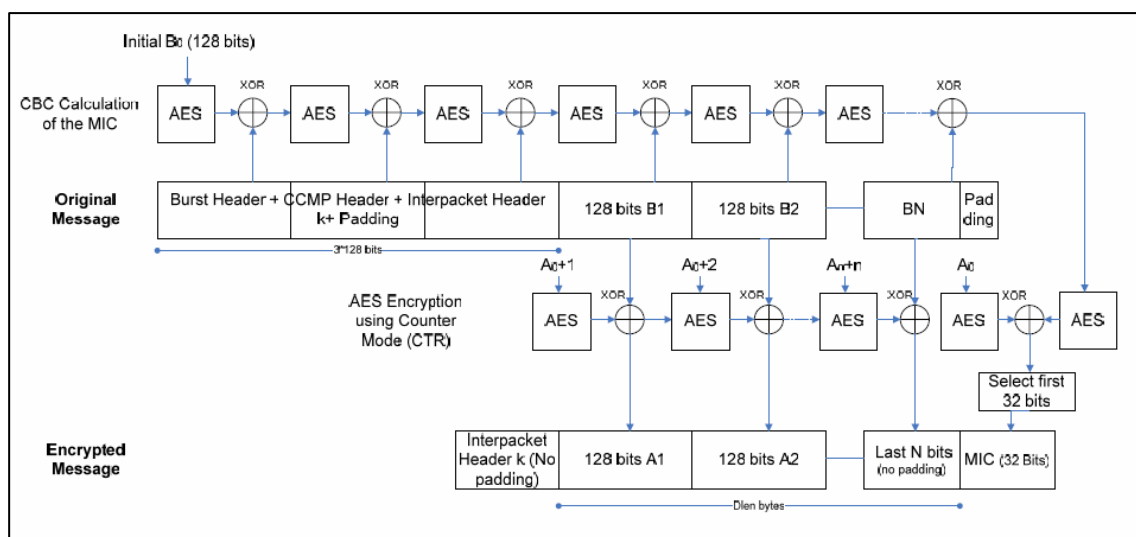
- Přístupový protokol pro příjem nových uzlů v síti
- Port solver protokol, pro výměnu adresních informací mezi uzly
- Cluster discovery protokol, pro hledání uzlů, které mohou vysílat souběžně bez ovlivňování ostatních uzlů

- Vylepšené CAC (Connection Admission Control) pro rezervaci přenosového toku pro datové toky
- Protokol pro automatickou správu a přechod mezi nesynchronními systémy, který se používá pokud se navzájem ovlivňují nezávislé sítě.

4.3.6 Šifrování a integrita dat

Šifrování a integrita dat jsou podle [7] nutné pro zajištění bezpečnosti a utajenosti přenášovaných zpráv. U zařízení PLC je použito blokové šifry AES dle specifikace FIPS-97 a mód zřetězení CTR. Proti narušování integrity a falšování dat je použit mechanismus CCM, který kombinuje mód řetězení CTR s autentifikací zpráv CBC-MAC. Při použití mechanismu CCM jsou definovány dva parametry (M a L). M indikuje délku datového pole obsahující MIC (Kontrolní součet) a L indikuje délku samotné zprávy. Pro zvolený algoritmus se hodnota M rovná 4, tudíž hodnota MIC zabírá velikost 4 bytů a hodnota L se rovná 2, proto délka zprávy je 2^{16} bytů, což odpovídá vlastní délce rámce.

Šifrování a zajištění integrity dat jsou založené na AES blokové šifře, která potřebuje rozdílné způsoby inicializace a různé módy řetězení. Informace pro nastavení úvodního stavu pro dešifrování a kontrolu integrity jsou přenášeny v hlavičce CCMP. Šifrování se provádí pokud je nastaven příznakový bit u rámce použitím CCMP hlavičky a která se přenáší na začátku komunikace.



Obr. 4.3: Šifrování dat a zajištění integrity u PLC technologie

Při vlastním šifrování jsou nejprve data rozdělena do bloků dat o velikosti 128 bitů, ty jsou zřetězeny a aplikován na nich algoritmus AES. Pro zajištění integrity jsou do šifrovaných zpráv vkládány vyplňovací bity (padding bits) a aplikován mechanismus CCM tak jak je znázorněno na obrázku 4.3.

Výměna klíčů je založena na protokolu Diffie-Hellman. Pro bezpečné spojení je potřeba si vyměnit klíč k symetrické šifře přes ještě nezabezpečený kanál. Právě tento protokol to umožňuje aniž by byl klíč jednoduše poslán v otevřené formě. Výpočet je založen na složitosti výpočtu diskretního logaritmu. Princip lze popsat následujícím způsobem.

- Jeden z účastníků komunikace zveřejní číslo α a m ,
- Každý i -tý účastník si zvolí číslo k_{priv}^i , které bude sloužit jak jeho soukromý klíč a spočte svůj veřejný klíč, který následně zveřejní,

$$k_{pub}^i = \alpha^{(k_{priv}^i \cdot k_{priv}^j)} \bmod m \quad (4.1)$$

- Pokud spolu chtějí komunikovat účastníci i, j , spočtou si obě strany klíč komunikace podle vzorce (4.2).

(4.2)

$$K_{i,j} = \alpha^{(k_{priv}^i \cdot k_{priv}^j)} \bmod m = (k_{pub}^j)^{(k_{priv}^i)} \bmod m = (k_{pub}^i)^{(k_{priv}^j)} \bmod m$$

5. Konfigurace DS2

Každé PLC zařízení může být ovládáno protokolem SNMP (Simple Network Management Protocol). Komunikace probíhá pomocí primitiv na operačním systému Linux, které mají vlastního SNMP agenta. Uživatelské CPE modemy, které nejsou založeny na Linuxu, jsou nepřímo ovládány přes SNMP agenta, který je u hlavního opakovatele.

Každý SNMP agent odesílá několik MIB (Management Information Base). Komunikace začíná když systém žádá hodnoty od HE nebo od Repeateru pomocí SNMP příkazu obsahujícím proměnné MIB, v odpovědi modem odpoví s vyžadovanou hodnotou.

5.1 Webové rozhraní NMS

Pro řízení, konfiguraci a sledování zařízení je určen prvek pod označením NMS (Network Management System). Tento prvek v síti dokáže vysíláním SNMP příkazu nastavovat jednotlivé prvky v síti. Jeden z možných způsobů konfigurace je grafické webové rozhraní. Toto webové rozhraní dovoluje kompletní správu nad celou sítí.

Na samotné rozhraní lze přistoupit přes internetový prohlížeč zadáním IP adresy a předřazením šifrovaného webového protokolu `https://192.168.1.1`. V prostředí učebny lze na zařízení také přistoupit přes vnější IP adresu 147.229.148.114.

Po připojení je následně možné konfigurovat hlavní nastavení připojených sítí (záložka General Settings - WAN). V tomto nastavení je vhodné zanechat statickou IP adresu 147.229.148.114 z důvodu omezení negativních vlivů školního DHCP serveru pro snadnou konfiguraci rozhraní. Následně je vhodné povolit přístup z veřejné sítě WAN (položka Allow admin access – LAN and WAN).

Nyní je možné přistoupit k samotnému nastavení PLC sítě. Po vložení MAC adresy Head Endu a jeho podřízených prvku (CPE, REP) je možné jejich síťová nastavení měnit v záložce network. Je zde třeba poznamenat, že jednotlivá zařízení nemají předem definovanou roli, tato role je jim dána právě nastavením v NMS. Zařízení jsou definována takovým způsobem, aby se pokaždé dotazovali NMS systému na svou roli v síti.

Po přidání MAC adres se zobrazí struktura definovaná na obrázku 5.1. V této lze nastavit v nabídce Permanent settings definovat pevně IP adresu pro každé zařízení, kdy i po odpojení ze sítě si zařízení bude pamatovat svoje nastavení po dalším přihlášení do sítě. Slaves authentication definuje permanentní nastavení ve stromové struktuře (Fixed list) a případně ověřování přes server. Pro vytvoření privátní sítě je tu možnost VLAN, kdy lze definovat klientská PLC jako izolované jednotky nebo definovat dvě

virtuální sítě, které na sebe navzájem nemohou vidět. Struktura NMS webového rozhraní lze rozčlenit následujícím hierarchickým způsobem.

- **General Settings**

Definuje unikátní nastavení pro komunikaci v síti, veřejnou IP adresu a vnitřní podsíť.

- **PLC**

Záložka pro definici jednotlivých vlastností PLC prvků v síti jejich charakteristických vlastností a přenosových parametrů. Jedná se především o nastavení IP adres jednotlivých zařízení, zjištění a správa fyzické přenosové komunikace mezi zařízeními a kontrola QoS.

- **Network**

Slouží k zapsání MAC adresy, získané z PLC zařízení a následnou konfiguraci IP adresy, permanentní IP adresy, autentikace zařízení a nastavení PLC VLAN.

- **Nastavení permanentní IP adresy (Permanent Settings)**

Toto nastavení slouží k nastavení zda zařízení bude zachovávat svoji IP adresu i po odpojení od sítě. Při dalším zapojení, pokud se nahraje nastavení do paměti, bude se hlásit s nastavením, které bylo nastaveno jako permanentní.

- **OVLAN**

Položka jež dovoluje nastavit privátní sítě tz. sítě které jsou jednotlivým účastníkům separátních sítí neviditelné.

General settings | **PLC** | Logs

Display settings: ☒ Detailed list

PLC Network

- 00:13:96:00:CA:8B
- 00:13:96:00:CA:7D

Network | Signal | QoS | Control

Node network settings

Description

Type of node: HE

MAC address: 00:13:96:00:CA:8B

IP address: 192.168.1.2

Permanent settings: ☐ Yes: node writes the settings in its memory
☒ No: node downloads the settings at boot time

Save and apply to the configuration of all sub-nodes

Slaves authentication: ☒ No
☐ Fixed list
☐ RADIUS server
☐ Shared list

OVLAN: ☐ Yes
☒ No

Obr. 5.1: Síťové nastavení NMS

- **Signal**

Je možné změnit několik parametrů, jedná se především o nastavení Signálového módu, kdy je možné nastavit až 14 možností v rozsahu pásma od 2 do 34 MHz.

- **Signal modes**

Právě zde je možné nastavit signálový mód. Nejlepší nosná křivka je přiřazena módu 6 (4-34 MHz). Pro komunikaci je tato křivka nejvýhodnější z důvodu širokého rozsahu.

- **Signal sub-mode**

Slouží pro nastavení podružného módu pro ustanovení v které části pásma bude největší spektrální účinnost, na výběr je ze čtyř módů.

- **Transmission Gain**

Pro ustanovení vysílacího výkonu na straně vysílače, obvykle je nastaveno 12 dB.

- **Reception Gain**

Zde je možné stanovit jaký maximální zisk je ještě možné přijmout a naopak pod jakou hranici je signál považován jako šum.

General settings | **PLC** | Logs

Display settings: ☒ Detailed list

PLC Network

- 00:13:96:00:C9:D5 * 8
- 00:13:96:00:C9:DB 6

Node signal settings

Frequency band in mode 8

2 MHz

Signal modes
Detected: 8

- ☐ 1 (3 MHz - 13 MHz)
- ☐ 2 (13.5 MHz - 23.5 MHz)
- ☐ 3 (24 MHz - 34 MHz)
- ☐ 4 (3 MHz - 23 MHz)
- ☐ 5 (14 MHz - 34 MHz)
- ☐ 6 (4 MHz - 34 MHz)
- ☐ 7 (2 MHz - 7 MHz)
- ☒ 8 (8 MHz - 13 MHz)
- ☐ 10 (2 MHz - 12 MHz)
- ☐ 11 (8.5 MHz - 34 MHz)
- ☐ 12 (8 MHz - 28 MHz)
- ☐ 13 (2 MHz - 32 MHz)
- ☐ 14 (13 MHz - 33 MHz)

Signal sub-mode

- ☒ A
- ☐ B
- ☐ C
- ☐ D

Transmission gain
Detected: 12 dB

12 dB

Reception gain
Detected: -12 dB

- ☒ Automatic
- ☐ Fix

Maximum gain

30 dB

Minimum gain

-12 dB

Obr. 5.2: Nastavení signálového módu v NMS

- **Control**

Zde jsou všechny nástroje pro správu (přidání, odstranění, replikace a přemístění modemů ve stromové struktuře).

- **Reload Settings**

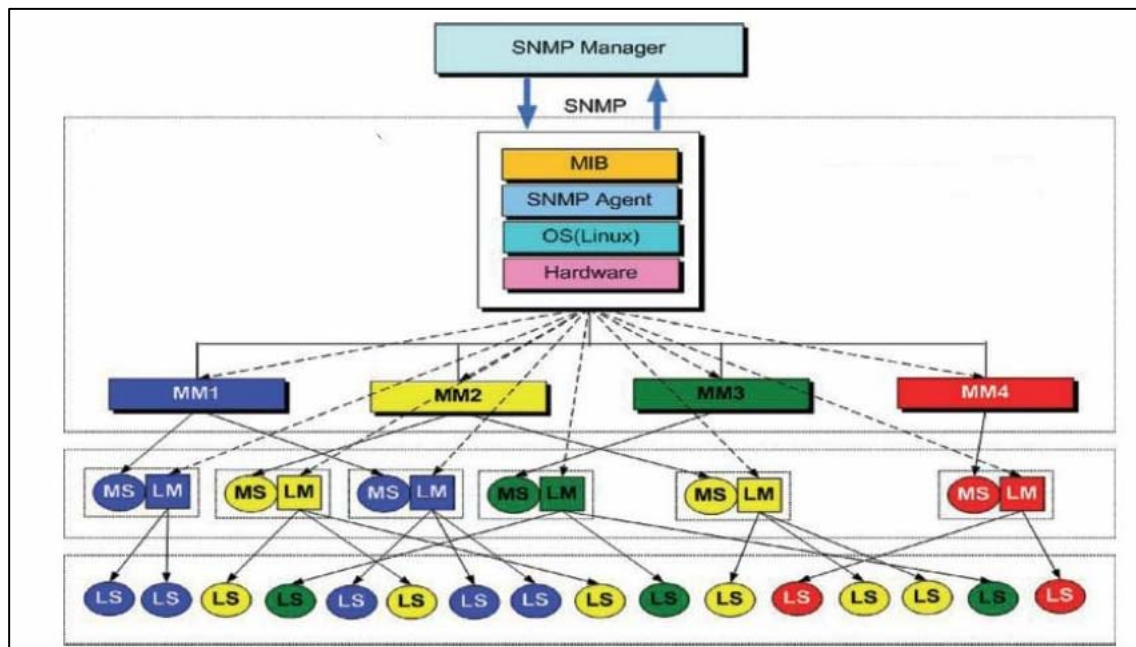
V případě konfliktu IP adres jednotlivých PLC zařízení síť nebo v případě jiných problémů je možné nahrát znovu definovanou konfiguraci do žádaného zařízení touto volbou.

- **Restart Settings**

V případě delší prodlevy při připojování je možné použít volbu Restart Settings pro inicializaci zařízení. Tato volba nabízí možnosti Standard nebo Clear Settings. Rozdíl mezi nimi je takový, že volba Standard provede restart jen daného prvku zatímco volba Clear Settings provede restart i v NMS.

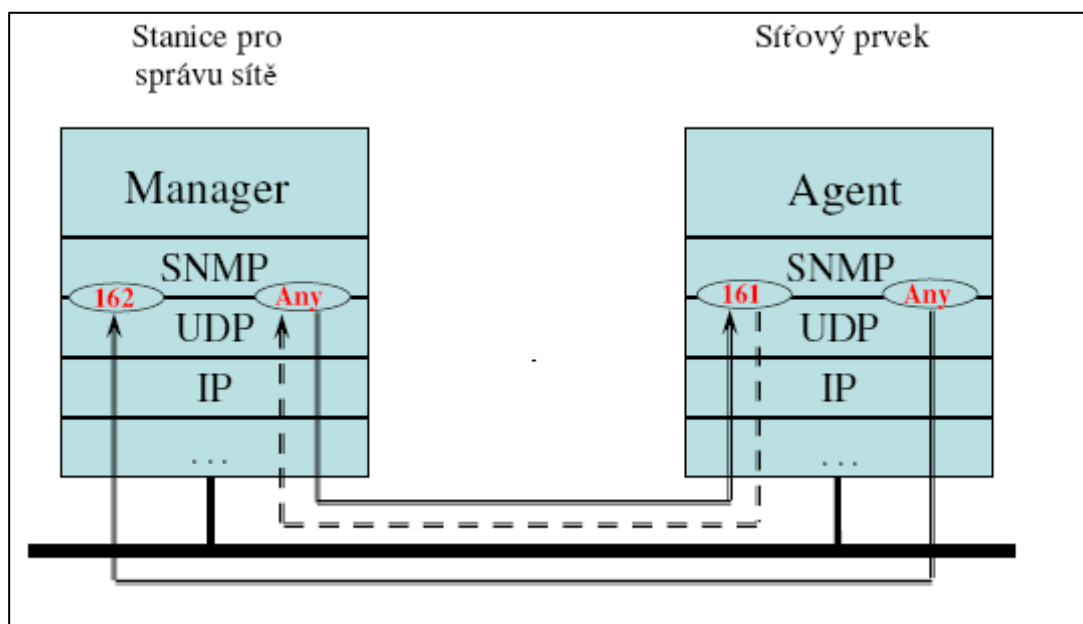
5.2 Architektura PLC NMS

Struktura na obrázku 5.3 ilustruje řídicí systém PLC sítě (NMS) Network management systém použitý pro ovládání PLC modemů na nízkém a vysokém napětí. Pro konfiguraci používá SNMP agenty.



Obr. 5.3: Architektura PLC řídicího systému

Každý modem v naznačené struktuře má konfiguraci pro serverovou a klientskou stanici. Server (tzv. Agent) je nainstalován na dohlíženém/řízeném zařízení, klient (tzv. Manager) je nainstalován na dohlízejícím/řídícím zařízení. Klient získává řídicí informace z jednoho nebo více podřízených modemů, které mají stejné označení (ID) v závislosti na fyzickém umístění. SNMP agent poskytuje řídicí informace o síťových zařízeních pro SNMP manager a používá všesměrové zprávy na linkové vrstvě (MAC). Modemy následně odpovídají s informací o jejich stavu a umístění. Manager jednoduše komunikuje s Agentem pomocí databáze MIB (Management Information Base). Struktura databáze MIB je standardizovaná a má hierarchické a stromové členění. Konkrétní položku databáze určuje posloupnost čísel hran od kořene k příslušnému koncovému uzlu. Výrobci síťových zařízení si mohou v tomto směru vytvářet vlastní podstromy.

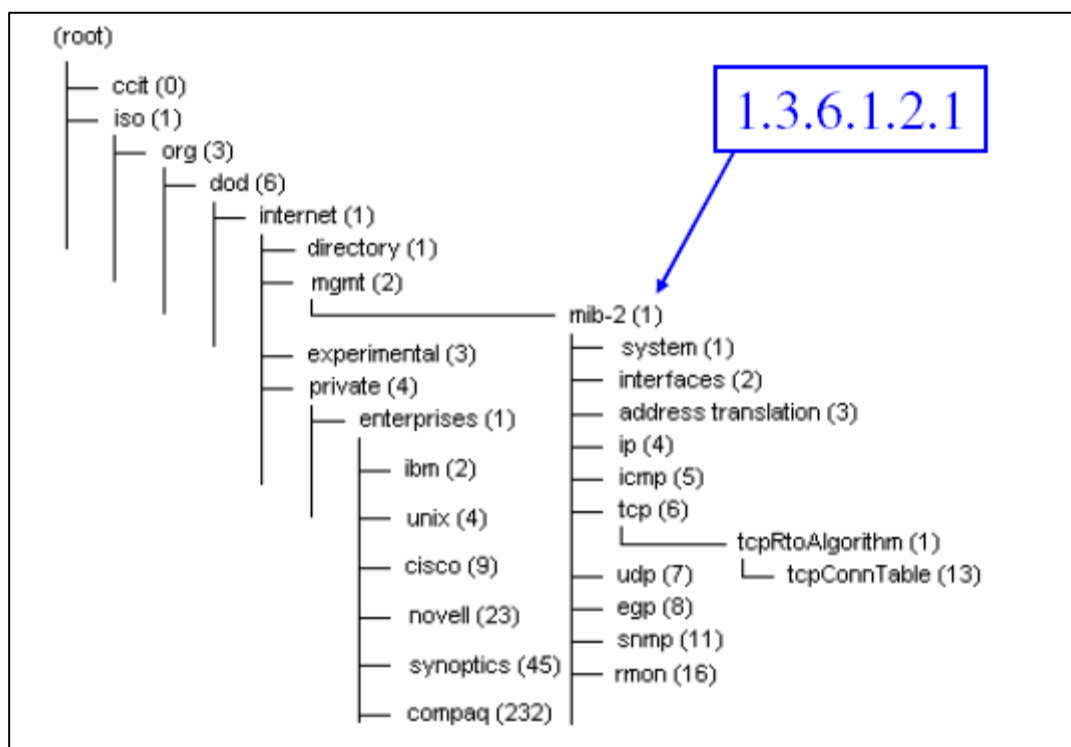


Obr. 5.4: Místo protokolu SNMP v OSI

Agent zpravidla zasílá data na základě požadavku Managera. Manager může vysílat z libovolného portu X a Agent naslouchá na portu 161. Odpovědi zasílá zpět na port X. V určitých situacích (výpadek, kolize, dosažení hraniční hodnoty...) se však Agent může na Managera obrátit sám. V tom případě Agent může vysílat z libovolného portu X a Manager naslouchá na portu 162.

Informace o dohlíženém/řízeném zařízení jsou strukturovány podle typu zařízení do databáze MIB (Management Information Base). V každém síťovém zařízení jsou definovány informační položky (např. počet přenesených paketů) a řídicí položky (např. zapnuto/ vypnuto). Struktura databáze MIB je standardizovaná a má hierarchické a stromové členění. Konkrétní položku databáze určuje posloupnost čísel hran od kořene k příslušnému koncovému uzlu. Výrobci síťových zařízení si mohou v tomto směru vytvářet vlastní podstromy.

Databáze MIB u PLC modemů je sestavena z hlavní tabulky, řídicí tabulky, PLC tabulky a výkonnostní tabulky. Hlavní tabulka obsahuje informace o skupině řídicích modemů. Řídicí tabulka nese data o registrovaných řídicích modemech narozdíl od PLC tabulky, která nese základní informace o PLC síti. Pomocí těchto tabulek mohou být získány a analyzovány různé informace. Poslední jmenovaná výkonnostní tabulka nese informace o opakovacích, a koncových modemech kromě modemů které jsou registrovány v hlavní tabulce.



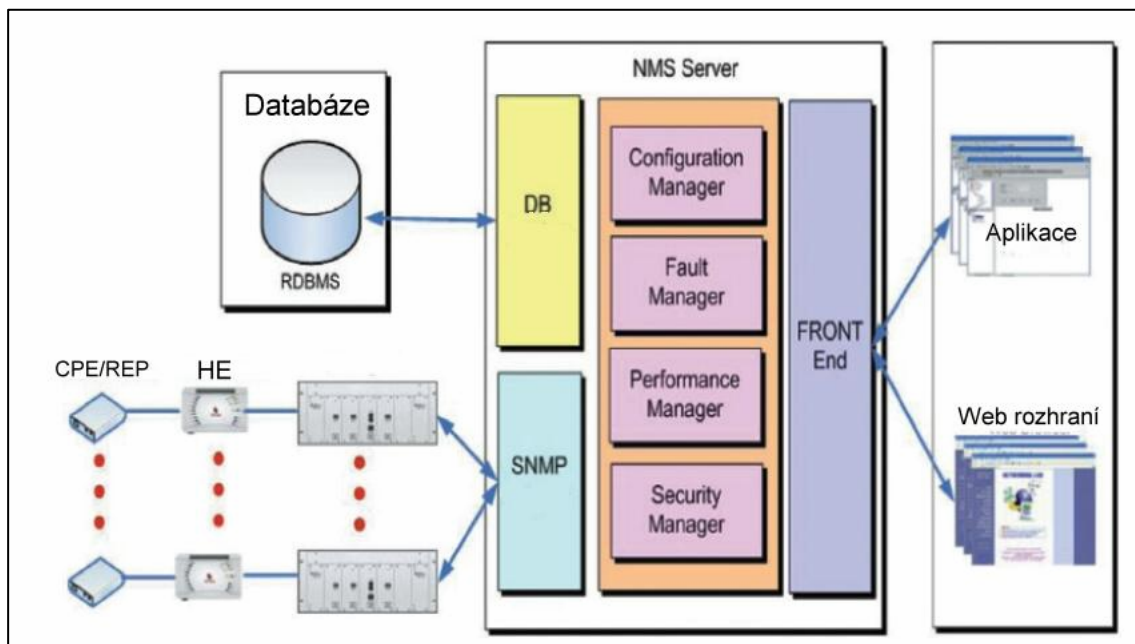
Obr. 5.5: Struktura databáze MIB

Po připojení na NMS Server, který je zobrazen na obrázku 5.6, lze ovládat jednotlivé systémové bloky.

- předřazený člen – zajišťuje komunikaci mezi klientem a serverem,
- databázový stroj – modul, který zajišťuje přístup k MIB,
- SNMP blok – modul komunikující s jednotlivými zařízeními,
- konfigurační manager.

Pomocí konfiguračního manageru lze sledovat všechny stavy sítě. Konfigurační manager se skládá z tří modulů. Modul pro nalezení prvků sítě, modul pro nastavení topologie a mapovací modul pro zobrazení řízené sítě.

První modul vyhledává všechny informace o modemech v PLC síti. Po nalezení připojených modemů jim přiřadí IP adresy definovanou podsítí. Modul pro nalezení topologie vytvoří vztahy mezi jednotlivými modemy a různými podsítěmi. Mapovací modul zobrazí vytvořenou topologii v grafickém rozhraní (GUI).



Obr. 5.6: Architektura NMS Serveru

6. Metodika testování

Pro PLC zařízení nejsou specifikovány žádné standardy a doporučení. Byly proto vybrány parametry a měřitelné hodnoty, které je možné převzít z doporučení RFC 1242 a RFC 2544. Dokument RFC 1242 byl vydán v roce 1991 a obsahuje terminologii pro výkonnostní srovnávací testy, propustnost a zpoždění. RFC 2544 vydaný v roce 1999 je rozšířením předchozího a navíc popisuje jednoznačnou metodologii testů včetně formátu pro reprezentaci výsledků. Dokumenty jsou sestavovány pracovní skupinou BMWG (Benchmarking Methodology Working Group), která patří do sdružení IETF (Internet Engineering Task Force). Pro doplnění standardů a upřesnění byly další měřitelné parametry získány z internetových stránek sdružení OPERA, která se zabývá standardizací PLC zařízení. V rámci práce tak budou měřeny standardizované parametry, které jsou ve výše zmíněných doporučeních a následně budou měřeny doplňující parametry, které jsou pro danou technologii důležité. Pro stanovení metodiky byly oporou následující dokumenty [14], [6], [7], [8].

- **Vyhodnocení propustnosti**

Pro získání propustnosti bude vycházeno ze standardu RFC 2544. Test je založen na zasílání rámců s určitou rychlostí do zařízení a následným vyhodnocením přijatých rámců. Pokud počet přijatých rámců odpovídá počtu vyslaných je zvýšena rychlost vysílání rámců. Pokud je dosažena nejvyšší rychlost, kdy jsou počty přijatých a vysílaných rámců rovny, pak je zjištěna propustnost.

- **Zjištění zpoždění (latence)**

Bude provedeno testování jednosměrného zpoždění, tedy čas, který uplyne mezi dobou odeslání rámce a jeho přijetím. Test bude trvat 120 sekund. Po 60 sekundách se do toku přidá označený rámec a zaznamená se čas jeho odeslání. Přijímací strana rozpozná označený rámec a vyhodnotí čas příchodu.

- **Zjištění ztrátovosti paketů**

Ztrátovost je údaj v procentech, který vyjadřuje, kolik rámců mělo být přeneseno, ale z nějakého důvodu k tomu nedošlo. Ztrátovost Z lze vyjádřit dle vztahu 5.1, kde P_z je počet zaslaných rámců a P_p je počet přijatých rámců.

$$Z = \frac{(P_z - P_p) \cdot 100}{P_z} [\%] \quad (5.1)$$

- **Monitorování PLC kanálu**

Účelem tohoto typu doplňujícího testu bude měření fyzické rychlosti a vliv útlumu v přenosovém kanálu na propustnost. Charakteristika PLC kanálu se mění v závislosti

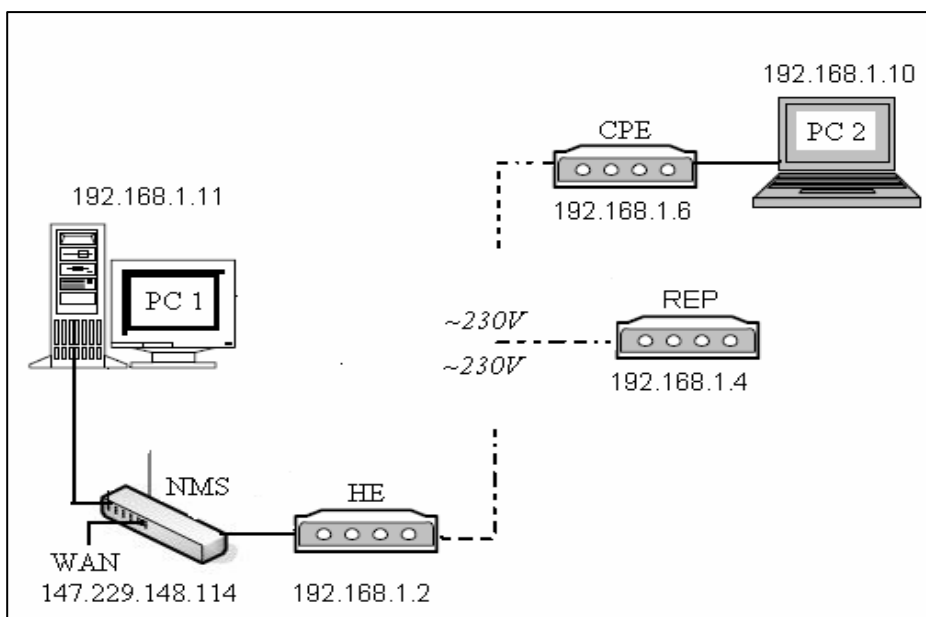
na čase a proto není odpověď konstantní a tím je ovlivněna výkonnost přenosu. Tento efekt znamená, že PLC zařízení musí mít mechanismus pro přizpůsobení parametrů své aktuální charakteristice, která dává informaci o optimálních přenosových poměrech. Měření bude prováděno s přenosnými PLC zařízeními a následné výsledky budou reprezentovány ve formě grafu.

- **VoIP přes PLC**

Toto měření analyzuje přenos hlasu přes síť založenou na PLC zařízeních. Bude provedeno vyhodnocení kvality spojení objektivním měřením pomocí nástrojů k tomu určených. Parametrem bude hodnota MOS a R faktor, který udává číselnou hodnotu kvality přenosu zvuku v závislosti na dostupných podmínkách.

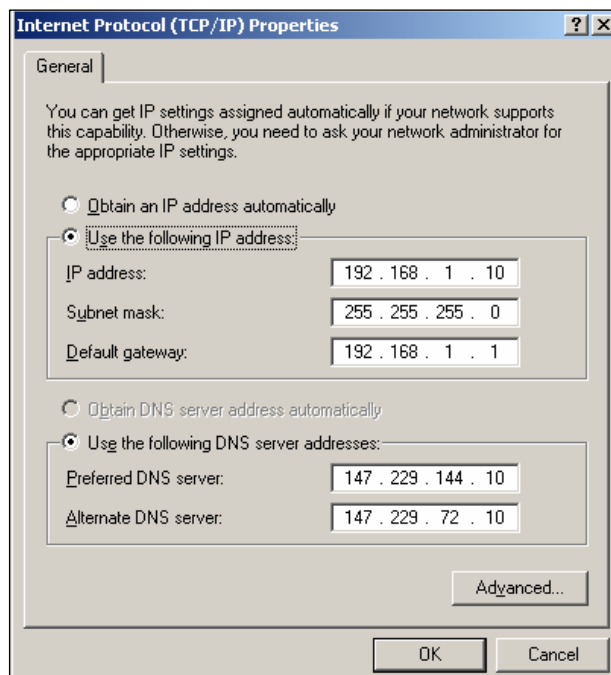
6.1 Návrh laboratorní sítě

Pro vlastní měření byla zvolena následující laboratorní struktura sítě, kdy jsou všechny prvky zapojeny na stejné podsíti. Do zařízení NMS je přivedeno síťové připojení z fakultní sítě, z tohoto zařízení je následně připojen PC 1 a HE. Přes rozvod elektrického napájení v učebně je připojen účastnický modem CPE a na něj PC 2. V následném zapojení jsou koncové počítače na stejné podsíti a může být mezi těmito zařízeními provedena měření, která neprochází přes školní síť. V celém měření je uvažován počítač PC 1 jako stacionární a jsou z něj pro toto měření spouštěny aplikace jako ze serveru.



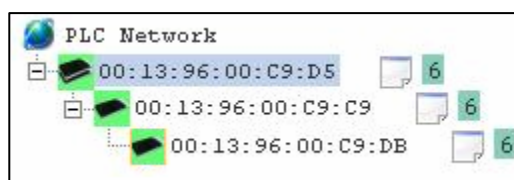
Obr. 6.1: Zapojení laboratorní sítě

U počítačů je nutné nastavit statickou IP adresu, která odpovídá současnému stavu sítě v prostorách učebny.



Obr. 6.2: Nastavení statické IP adresy

Nyní je nastavena fyzická struktura umožňující propojení zařízení, v následném kroku je možné se připojit na směrovač s funkcí správy PLC sítě NMS (Network Management System) na adrese 192.168.0.1. Zde se vytvoří jednoduchá struktura hierarchického stromu skládající se ze tří prvků HE, REP a CPE.



Obr. 6.3: Zapojená struktura přes webové rozhraní

Pro toto zapojení je možné nyní provést měření na fyzické vrstvě. K tomu je určen program *ds2speed.exe* informující o stavu a rychlosti sítě. Tento program může též sloužit jako analyzátor připojení, vysílá SNMP dotazy na PLC zařízení. Pokud se nezdaří připojení, je zobrazena chyba *SnmpMgrRequest error: 40* v opačném případě je zobrazena přenosová rychlost na fyzické vrstvě a to v uploadu a downloadu.

6.2 Vyhodnocení propustnosti

Měření propustnosti je jednou z hlavních prvků standardu RFC 1242. Propustnost se dělí na maximální a dostupnou. Maximální propustnost je nejvyšší přenosová rychlost, která může být úspěšně nastavena na dvou stanicích. Dostupná propustnost je definována jako časově stálá mezi dvěma body při všech nastavených podmínkách, jakým je přenosový protokol, hardware a operační systém.

Pro měření propustnosti se dle normy používá rámců linkové vrstvy. Rámce je ale možné vkládat do protokolů vyšších vrstev, proto bude použit segment TCP, který využívá přenášené rámce a dovoluje lepší segmentaci. Zásadním rysem protokolu TCP je okénkování (windowing) zajišťující plynulost přenosu. Okénko TCP je množství nepotvrzených dat, které může mít velikost až 1 GB. Ve skutečnosti se takové okénko nepoužívá, ale nastavuje se podle aktuálních vlastností sítě, softwaru a hardwaru.

Mnoho operačních systému má standardně nastavenou velikost okénka pro vhodnou propustnost. Během spojení TCP se volí taková nastavení aby vysílač vysílal co nejmenší a přijímač přijímal co největší okénko. Z tohoto důvodu je propustnost C ovlivněna mnoha faktory a maximální možnou propustnost lze stanovit pomocí velikosti okénka a zpoždění na síti podle vzorce 5.2, kde w je velikost okna v kB za sekundu a D je zpoždění, neboli doba šíření signálu od zdroje k cíli.

$$C = ((w) * 8 \text{ bitů}) / (2 * D) \quad (5. 2)$$

Na příkladu, kdy je použito okénko o délce 64 kB a zpoždění 135 ms lze zjistit, že propustnost odpovídá dle vzorce hodnotě 1.9 Mb/s.

$$C = (64 \text{ kB} * 8 \text{ bitů}) / (2 * 0.135) = 1.90 \text{ Mb} / \text{s} \quad (5. 3)$$

Po zvětšení velikosti okna na hodnotu 1 MB bez snížení transportního zpoždění se situace změní na hodnotu.

$$C = (1 \text{ MB} * 8 \text{ bitů}) / (2 * 0.135) = 30 \text{ Mb} / \text{s} \quad (5. 4)$$

Vlastní zjištění propustnosti bude prováděno pomocí vysílání určitého počtu rámců do zařízení. V případě, že se počet přijatých rámců bude rovnat počtu vyslaných bude hodnota zvýšena. Pokud bude počet rámců menší než počet odeslaných, rychlost se sníží dokud nebude nalezena odpovídající hodnota propustnosti. Pro měření vlastní propustnosti lze použít různé nástroje.

- **Iperf**

Iperf byl vyvinut společností NLANR (The National Laboratory for Applied Network Research). V principu se snaží dostat měřené spojení do saturace, nasytit spoj měřícími rámcy. Výsledkem je míra propustnosti dostupná na dané cestě. *Iperf* je nutné nainstalovat na obou koncích měřené trasy. *Iperf* pracuje jako aplikace klient-server. Serverová aplikace poslouchá na portu číslo 5000 ovšem je nutné, aby byla spuštěna jako první z obou dvou. Jestliže klientská aplikace požádá o měření je vytvořeno kontrolní TCP spojení pro přenos konfiguračních parametrů a naměřených výsledků. V zápětí je sestaveno měřící spojení pro měření parametrů spoje. Přenos probíhá z klientské aplikace na aplikaci serverovou. Po ukončení měření jsou naměřená data zaslána klientské aplikaci a zobrazena na obou zúčastněných aplikacích. Nabízí i další funkce jako nastavení povolovacího okénka a měření více spojení. Na rozdíl od FTP spoje, *Iperf* přenáší data z klientské operační paměti do paměti serveru a nezasahuje na disk stanice.

- **NetDoppler**

Jedná se o užitečnou utilitu společnosti WildPacket, která umožňuje snadno provést zjištění cesty paketů sítí, testy zpoždění, odezvy vzdálených uzlů a propustnosti sítě, vše s přehlednými grafickými výstupy.

Po vyhodnocení se zdá být výhodnější program přenesený z linuxového prostředí s názvem *Iperf*. *Iperf* je napsán v jazyce C a pro nekomerční použití je možné jej stáhnout z <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>. Bude využívána sada předkompilovaných programů, která bude spouštěna pod operačním systémem Windows.

Před úvodním spuštěním je nutné nastavit síťové prostředí tak aby odpovídalo komunikaci klient – server, kdy server má IP adresu 192.168.1.11 a Klient 192.168.1.10. Tímto programem lze získat tyto parametry pro přenosové protokoly TCP a UDP.

Iperf informuje o propustnosti odesílaných a přijímaných dat, proto může být následně použit pro měření celkové propustnosti a ztrátě rámců. Pro snímání rámců během přenosu bude použit nástroj Ethereal.

Pro automatická měření během dlouhých časových intervalů bude spouštěna sada skriptů pro zpravování nástrojů. Tyto skripty budou vytvořeny pro specifické měřící účely. Bude se jednat o dávkové skripty pro Windows XP, které dovolí volání programu *iperf* se specifickými parametry a následně přesměrují výstup do textového souboru. Bude se jednat o následující typy testů.

- Maximální propustnost TCP provozu typu bod, bod (poloviční a plný duplex)

- Odezva (zpoždění)

Pro nastavení optimální propustnosti je nutné zjistit vliv velikosti okna. U TCP spojení lze odvodit vztah pro maximální možnou propustnost. Platí, že propustnost bude závislá na velikosti okna, době šíření signálu médiem a na přenosové rychlosti.

6.3 Vyhodnocení dlouhodobé propustnosti

V následujícím testu bude provedeno vyhodnocení závislosti systému na připojování zátěží do obvodu ve kterém pracují PLC modemy. Bude především sledována propustnost. Toto měření je odůvodněno tím, že PLC komunikační kanál je modelován jako časově měnící a frekvenčně závislý systém na různá rušení. Je sledována odolnost modulačních metod, které jsou schopny zpracovat neznámou fázi a útlum, který ovlivňuje přijímač v dlouhodobém testu. U dlouhodobých testů bude sledován přenos v plném a polovičním duplexu. Příkladem použití je síť založená na přenosovém mechanismu 100BASE-TX. Ten je schopný přenést 100 Mbps dat v half-duplex módu. Ve full-duplex mode, 100BASE-TX umožňuje stanicím vyměnit 200 Mbps dat za sekundu.

6.3.1 Poloviční duplex

Iperf vysílá z počítače PC1 TCP provoz na počítač PC2. Maximální rychlost bude zachytávána programem a pomocí skriptu bude ukládána do souboru. Tento provoz bude generován po dobu pěti minut během každé hodiny.

Na počítači PC1 bude spuštěn Iperf server (Iperf -s) pomocí skriptu server_TCP.bat. Klientská stanice PC2 spustí program Iperf s parametry (Iperf -c), který nakonfiguruje a spustí skript klient_TCP.bat. Pro specifické vlastnosti technologie bude zajištěno spuštění programu ethereal na počítači PC1, který zachytí 68 prvních bytů z každého rámce. Doba trvání je stanovena na 1 týden. Výsledkem programu ethereal a iperf by měli být tyto výstupy.

- Maximální TCP propustnost v odchozím směru
- Dopad běžného provozu na TCP propustnost v odchozím směru
- hodiny během dne
- dny za týden

6.3.2 Plný duplex

Iperf vysílá z počítače PC1 TCP provoz na počítač PC2 a z počítače PC2 TCP provoz na počítač PC1. Maximální rychlost bude zachytávána programem a pomocí skriptu bude ukládána do souboru. Tento provoz bude generován po dobu pěti minut během každé hodiny.

Na obou počítačích bude spuštěn Iperf server (Iperf -s) a Iperf klient (Iperf -c). Doba trvání je stanovena na 1 týden. Výsledkem programu etherreal a iperf by měli být tyto výstupy.

- Maximální TCP propustnost v odchozím směru
- Dopad běžného provozu na TCP propustnost v odchozím směru
- hodiny během dne
- dny za týden

6.4 Měření zpoždění

Zpoždění rámců definované v RFC 1242 je možné definovat jako čas, který uplyne mezi dobou odeslání rámce n ze zdroje vysílání a dobou přijetí na přijímači. Rozdělujeme dva hlavní druhy zpoždění, zpoždění jednosměrné a zpoždění obousměrné. Zpoždění jednosměrné odpovídá ve své podstatě předešlé definici tzn. čas odeslání rámce zdrojem, vysílání a časem jeho přijetí na straně přijímače rámce. Obousměrné zpoždění je také nazýváno jako RTT (oboustranné zpoždění - Round Trip Time), které zahrnuje dobu cesty k přijímači i dobu cesty od přijímače tak i dobu zpracování na přijímači. Obousměrné zpoždění se používá častěji, protože jej lze měřit z jednoho místa.

Zpoždění je také možné definovat pomocí charakteru a způsobu zpracování. Tímto způsobem lze definovat zpracování *store and forward*, kdy je nejprve rámec celý načten a až potom je započato s přeposíláním. Zpoždění lze v tomto způsobu definovat jako časový interval mezi průchodem posledního bitu na vstupním portu a objevením prvního bitu na výstupním portu. Dalším typem zpracování je *bit forwarding*, kdy je rámec ihned přeposlán na výstupní port. Posledním typem je zpracování *cut-through*, kdy je načtena jen hlavička a následuje přeposílání na výstupní port.

Specifikace RFC 1242 definuje, že je nutné před započatím testu zjistit propustnost pro rámce dané velikosti na daném médiu. Je zaslán tok rámců o definované velikosti, rychlostí naměřenou v testu propustnosti. Test by měl trvat nejméně 120 sekund. Po 60 sekundách se do toku přidá označený rámec a zaznamená se čas jeho odeslání. Přijímací strana rozpozná označený rámec a vyhodnotí čas příchodu. Zpoždění je následně rozdíl dvou časů. Test by měl být proveden minimálně dvacetkrát s vyhodnocením naměřených hodnot. Pro zajištění správných hodnot je nutné nastavit

přesný čas, vhodným způsobem bude nastavení pomocí NTP protokolu (Network Time Protocol).

6.4.1 Realizace měření zpoždění

Z počítače PC1 bude programem ping posílán paket ICMP na ostatní prvky v síti použitím programu bude zaznamenáván a ukládán do souboru. Každé měření bude trvat jednu minutu za časový úsek jedné hodiny. Zpoždění bude sledováno během dvou stavů.

- Normální provoz
- Zvýšený provoz v síti použitím TCP generátoru provozu

6.5 Monitorování PLC kanálu

U zařízení jsou nejčastěji udávaným parametrem fyzická rychlost. Jedná se o maximální přenesený počet bitů za sekundu, kterou daná technologie umožňuje přenést přes síťové médium. Pro jednotlivé technologie tak lze nalézt definované rychlosti na fyzické vrstvě, tyto jsou následně zobrazeny v následujícím výčtu.

- 200 Mb/s Defidev/DS2,
- 85 Mb/s Intellon HomePlug 1.0,
- 54 Mb/s IEEE 802.11 a/g Wi-Fi.

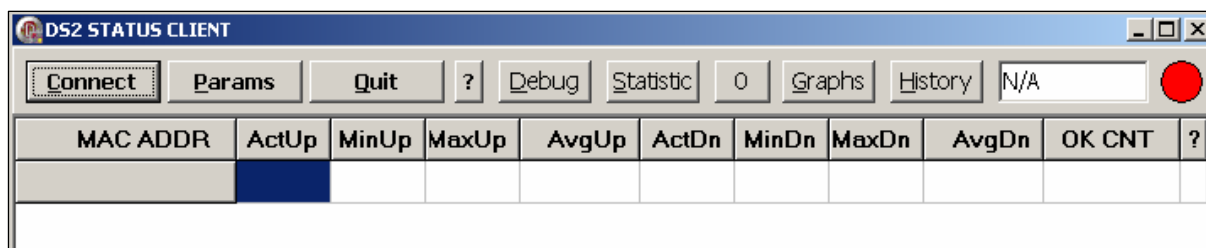
Fyzická rychlost je měřena na fyzické vrstvě. Bity na fyzické vrstvě tedy obsahují velké množství důležitých režijních bitů, které zajišťují definované operace pro zajištění bezchybného příjmu dat. Mezi následující operace patří

- forward Error Correction,
- nadbytečné informace (pro opravu chyb),
- adresování / směrování,
- potvrzovací pakety,
- přeposílání paketů (při špatném přijmutí paketu),
- kontrolní informace.

Nástroje pro měření propustnosti už následně měří více u aplikační vrstvy, propustnost je tedy mnohonásobně nižší. Pro monitorování PLC kanálu bude sledovaným parametrem hodnota BPC (Bits per Carrier). Zařízení DS2 komunikují po 1536 podružných nosných v ortogonálním multiplexu. Proto je potřeba mít adaptivní mechanismus který vkládá každou nosnou s adekvátním množstvím informace. V případě většího množství by nastávaly problémy (přenosové chyby) a v případě menšího množství na nosné by docházelo k neoptimálnímu využití (zmenšení fyzické propustnosti). Na každou nosnou je možné vložit 2 až 10 bitů na nosnou.

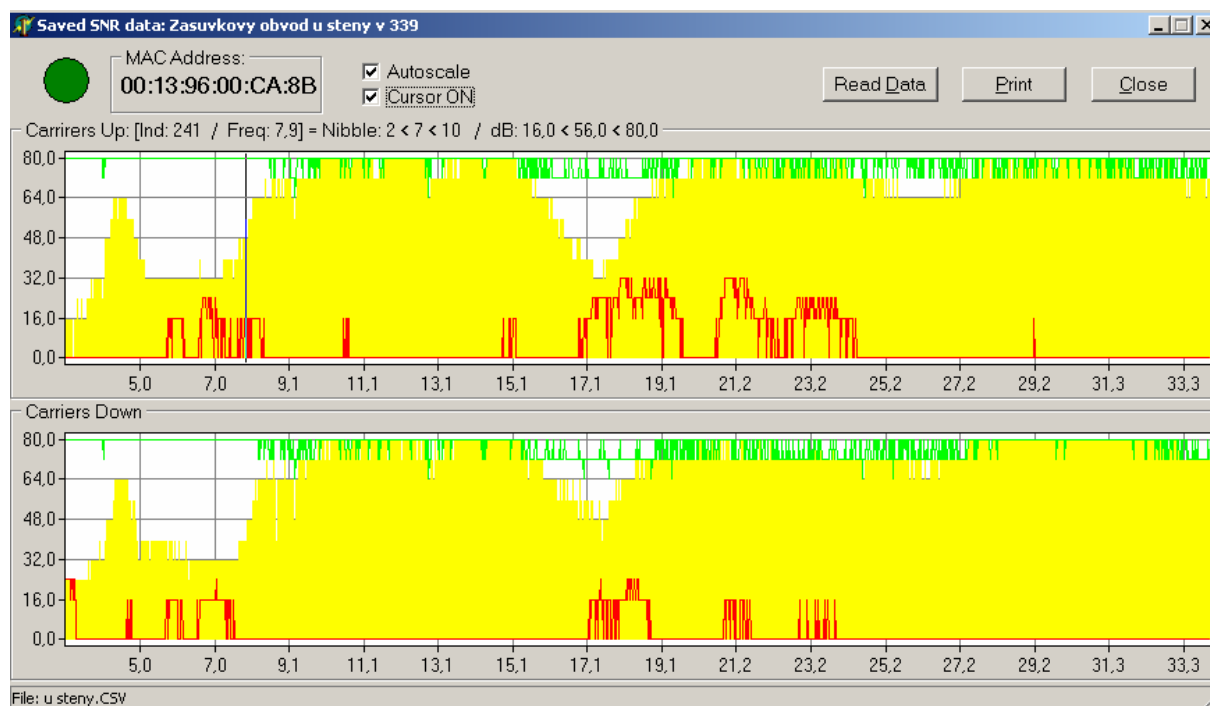
Algoritmus, který se rozhoduje nad vkládání počtu bitů analyzuje SNR zjištěnou na přenosovém kanálu na dané frekvenci a potom se rozhodne o vložení počtu bitů. Z tohoto důvodu jsou BPC grafy velice podobné, nikoli však přesně stejné, jako grafy SNR.

Pro sledování hodnoty BPC je program *DS2Status.exe*. Slouží k sledování Up/Down fyzické rychlosti headendu a jeho podřízených CPE resp. repeateru.



Obr. 6.4: Program DS2Status pro zjištění přenosové rychlosti a charakteristiky BPC

Po připojení (Connect) se zobrazí MAC adresa měřeného modemu a jeho přenosové rychlosti. V nastavení (Params) je možné nastavit IP adresu měřeného zařízení tak i rychlost obnovy zápisu a čtení dat. Po označení jednoho ze sloupců je možné získat grafy z naměřených hodnot. Vlastní hodnota BPC se zobrazí po kliknutí na MAC adresu daného zařízení. Po uložení průběhu BPC do souboru je možné takto uložený soubor otevřít v programu *ViewSNR.exe*, který zobrazí graf s informací o SNR.



Obr. 6.5: Zobrazení SNR

Pomocí představených nástrojů lze provést následné měření parametrů spojení v závislosti na vzdálenosti a na skutečném zapojení elektrické sítě.

6.6 VoIP přes PLC

VoIP je jedna z nejvíce rozšířených interaktivních, síťových aplikací. Požadavky na šířku pásma jsou nízké (64 kb/s), problémem je však vysoká citlivost na zpoždění a jitter. Z literatury [5] je známo, že zpoždění přenosu z úst do ucha menší jak 150 ms je vhodné pro velice kvalitní spoje, zpoždění od 150 do 400 ms je přijatelné a zpoždění 400 ms jsou nevhodná pro přenos zvuku. Z tohoto důvodu bude proveden jednosměrný test, který se bude soustředit na kvalitu zvuku u příjemce. Největší důraz bude na sledování tří, na PLC závislých, parametrů (zpoždění, ztrátovost rámců a jitter).

Zpoždění na PLC zařízeních jsou ovlivněny dvěma faktory. Jedná se především o síťové zpoždění, které je závislé na fyzickém médiu, protokolech a jitteru. Dále pak o zpoždění způsobené vyčkáváním na možnost vysílání a následném ukládání do front.

Pro tento test bude použita volně dostupná VoIP aplikace. Bude provedeno testování s kodekem G.711 (64 kb/s, charakteristika μ -law). Aplikace nebude potlačovat tiché prodlevy, nebude zpětně doručovat pakety mimo pořadí a nebude maskovat

pakety. Při použití RTP bude délka audio dat v paketu 40 ms. Použit bude buffer pro odstranění jitteru o délce 80 ms, který odpovídá dvou VoIP paketům. Bude prováděno testování ztráty paketů 0 a 10% a s průměrným jitterem o hodnotě od 0 do 75 ms, kdy kvalita se stane neúnosná.

Sledovaným parametrem bude číselná hodnota vyjadřující kvalitu spojení v závislosti na použitém kodeku označovaná jako MOS (Mean Opinion Score). MOS vyjadřuje numerickou hodnotou, dostupnou kvalitou přijímaného zvuku po jeho kompresi a přenosu. Hodnota MOS se pohybuje v rozmezí 1 – 5, kde jednička označuje nejhorší a pětka nejlepší kvalitu. Testy MOS jsou specifikovány v ITU-T doporučení P.800.

MOS je dle standardu zjištěn průměrováním výsledků subjektivních testů, kdy několik posluchačů hodnotí kvalitu zvuku přenášeného přes komunikační médium. Posluchač následně hodnotí pomocí následující tabulky.

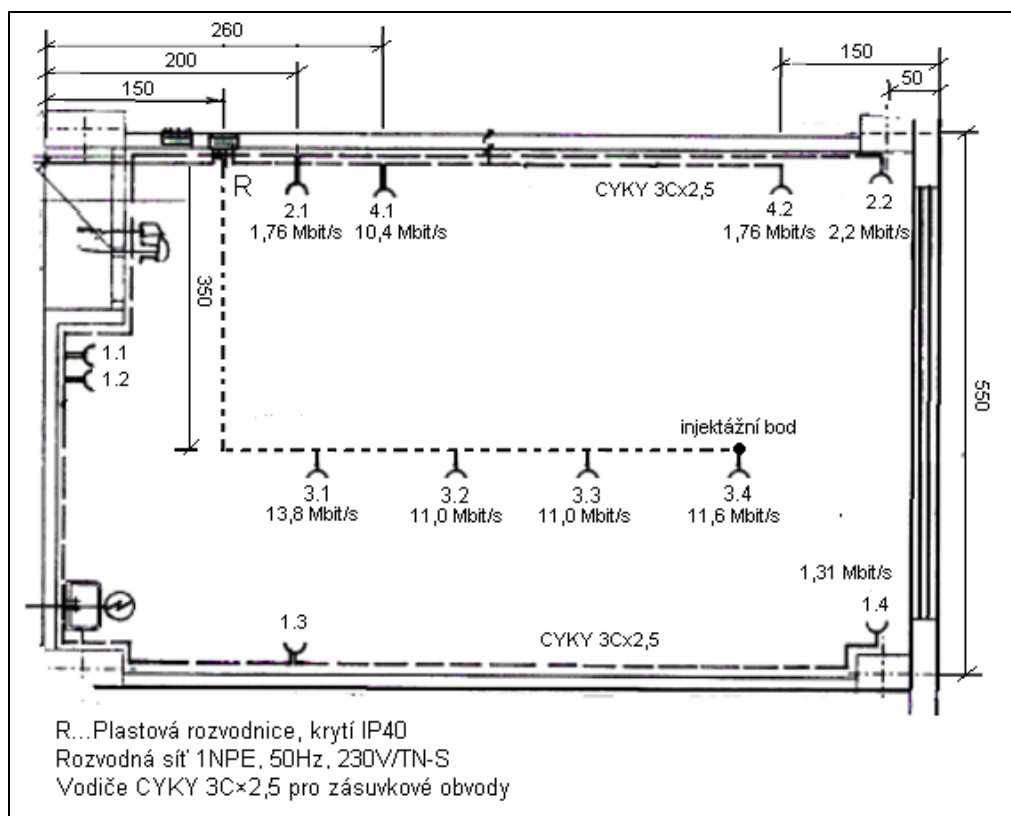
MOS	Kvalita	Zhoršení
5	Výborná	Nepostřehnutelné
4	Dobrá	Postřehnutelné
3	Uspokojivá	Lehce obtěžující
2	Bídna	Obtěžující
1	Špatná	Velice obtěžující

Tab. 6. 1: Stupnice hodnocení MOS (MOS Score)

Po dlouhodobých měření byla stanovena určitá statistická data, která umožňují v závislosti na parametrech sítě (zpoždění, jitter, použitý kodek) hodnotu MOS vypočítat. Jedná se o tzv. metodu PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality). Jedná se o objektivně měřící metodu, která predikuje subjektivní výsledky posluchačů. PESQ využívá psychoakustický, matematický model pro analýzu vyslaného a přijatého signálu. Signál je převáděn z časové domény do psychoakustické domény pomocí několika nelineárních procesů. Kvalita je určena hlavně pomocí rušivých vlivů v časové a frekvenční doméně.

7. Získaná data z provedených testů

Pro navržené testy je provedeno měření v závislosti na reálných podmínkách. V první části byly zjištěny parametry v prostředí laboratorní učebny. V tomto měření je především nutné porovnat vliv propustnosti při napojení koncového zařízení na jinou fázi a průchod pojistkovou skříní. NMS a HE je zapojen na pozici 1 a koncové zařízení se připojuje k pozicím, tak jak je to zobrazeno na obrázku 7.1.

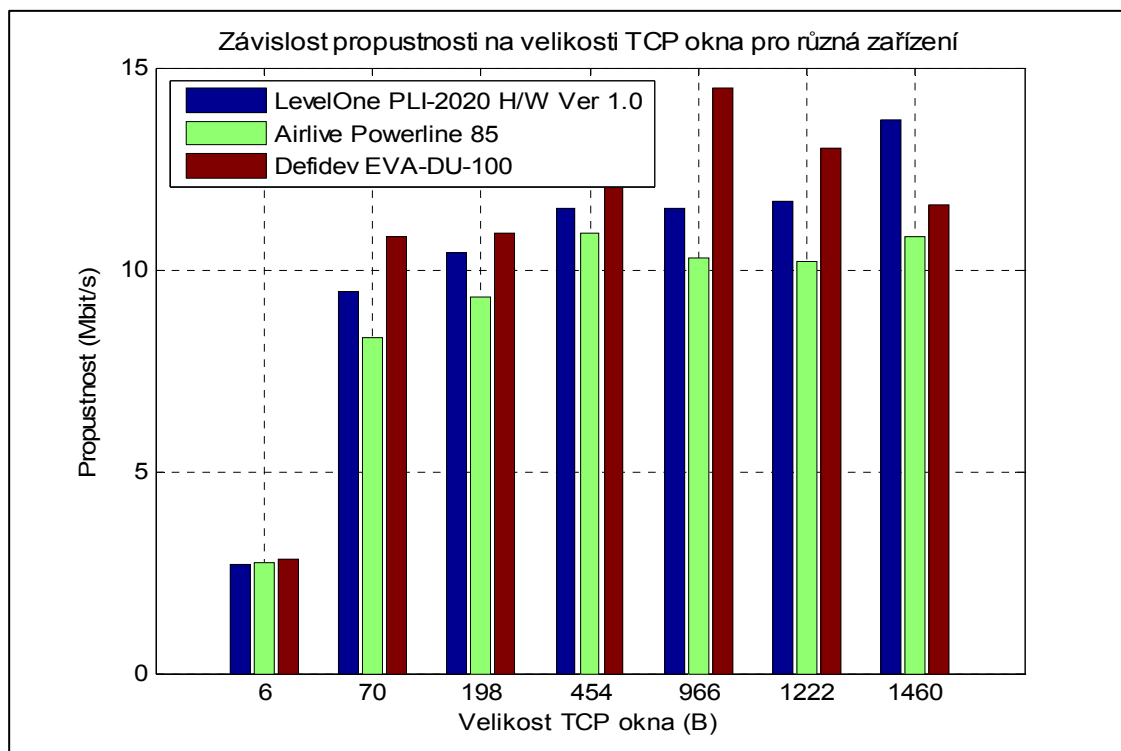


Obr. 7.1: Zapojení elektrické sítě v učebně PA-339

Z obrázku jsou patrné propustnosti pro jednotlivé pozice. Na místě rozvodu ve stole byly zjištěny maximální propustnosti. Na konci stolu byla větší propustnost než v místě injektáže.

7.1 Vyhodnocení propustnosti různých zařízení

Bylo provedeno měření pomocí programu Iperf, měření probíhala 60 vteřin, parametrem byla změna délky TCP segmentu (6, 70, 198, 454, 966, 1222, a 1460). Měření bylo provedeno na třech zařízeních (Level One PLI-2020, Airlive Powerline 85 a Defidev/DS2 ACPE 200).



Obr. 7.2: Porovnání propustnosti zařízení různých výrobců

	LevelOne PLI-2020 H/W Ver 1.0						
Délka TCP segmentu [B]	6	70	198	454	966	1222	1460
Upstream [Mbit/s]	2,25	8,95	10,2	10,6	11,1	11	12,8
Downstream [Mbit/s]	2,68	9,43	10,4	11,5	11,5	11,7	13,7

	Airlive Powerline 85						
Délka TCP segmentu[B]	6	70	198	454	966	1222	1460
Upstream [Mbit/s]	1,94	7,17	6,46	10,1	10,2	10,5	11,6
Downstream [Mbit/s]	2,73	8,29	9,32	10,3	10,2	10,8	11,9

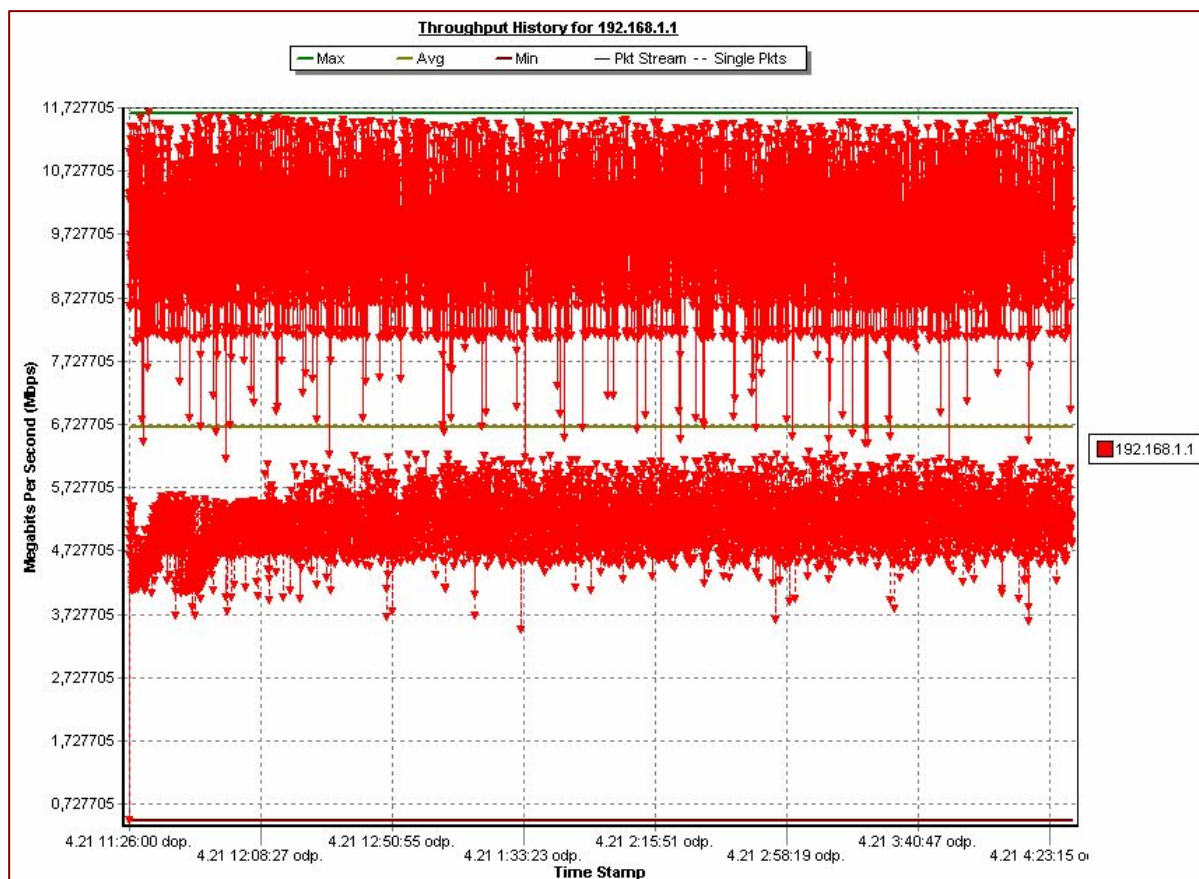
	Defidev/DS2 ACPE 200						
Délka TCP segmentu[B]	6	70	198	454	966	1222	1460
Upstream [Mbit/s]	2,16	13,4	14,8	14,4	14,6	14,4	14,9
Downstream [Mbit/s]	2,81	10,8	10,9	14,4	14,5	13	11,6

Tab. 7. 2: Propustnosti různých zařízení

Porovnáním jednotlivých zařízení je patrné, že zařízení Defidev/DS2 vykazuje největší propustnost vůči ostatním zařízením při měření pro různou velikost TCP okna. Změna nastává u přenosu TCP segmentu s velikostí okna 1460.

7.1.1 Dlouhodobá propustnost

Jedná se o podskupinu měření propustnosti, kdy je měřena maximální propustnost za dlouhý časový úsek pro získání dílčích výsledků budou jednotlivé hodnoty zobrazeny každou minutu.



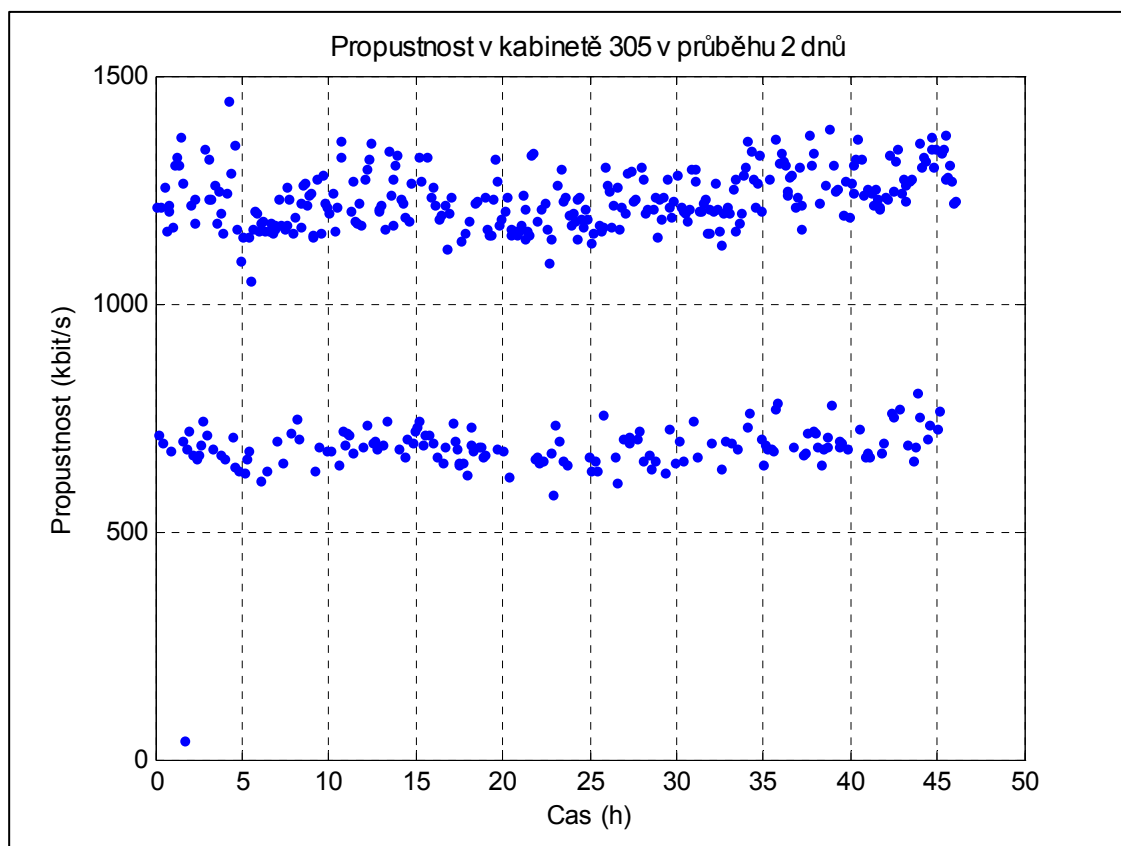
Obr. 7.3: Výstup propustnosti z programu Netperf

Pro definované měření propustnosti lze nalézt různé měřicí nástroje. Na obrázku je vyobrazen výstup z programu Netdoppler. V intervalu 5 hodin je měřena v prostorách laboratorní učebny. Nástroj Netdoppler získává informace pomocí vysílání protokolu ICMP a jeho následným příjmem. Na základě rozdílu lze odvodit propustnost, latency a počet síťových prvků přes které daná přenosová cesta prochází.

V daném grafu je patrné, že tento nástroj není v následném zobrazení příliš vhodný pro dlouhodobá měření. Data jsou nahuštěná a nelze rozeznat stavovou informaci jednotlivých bodů měření. Dále i z funkčního hlediska nelze přisoudit jasnou kompatibilitu s klasickými měřicími nástroji, jakými jsou nástroje založena na struktuře

klient – server. Nástroj Netdoppler zobrazuje dva průběhy udávající propustnost, naměřenou v pracovní den, není patrný vliv zarušení. V horní polovině obrázku je propustnost přenosu sledu paketů, ta se pohybuje na rozhraní 10,2 Mbit/s. Maximální hodnota (peak value) dosahuje 11,8 Mbit/s. Pro měření propustnosti metodou posílání jednotlivých paketů, je propustnost poloviční.

V rámci objektivního testování bylo provedeno dále měření pomocí nástroje iperf mezi jednotlivými učebnami. Délka trasy je odhadem 40 m. Signál prochází z učebny 339 kde je ponecháno injektážní zařízení a do koncového bodu v kabinetu



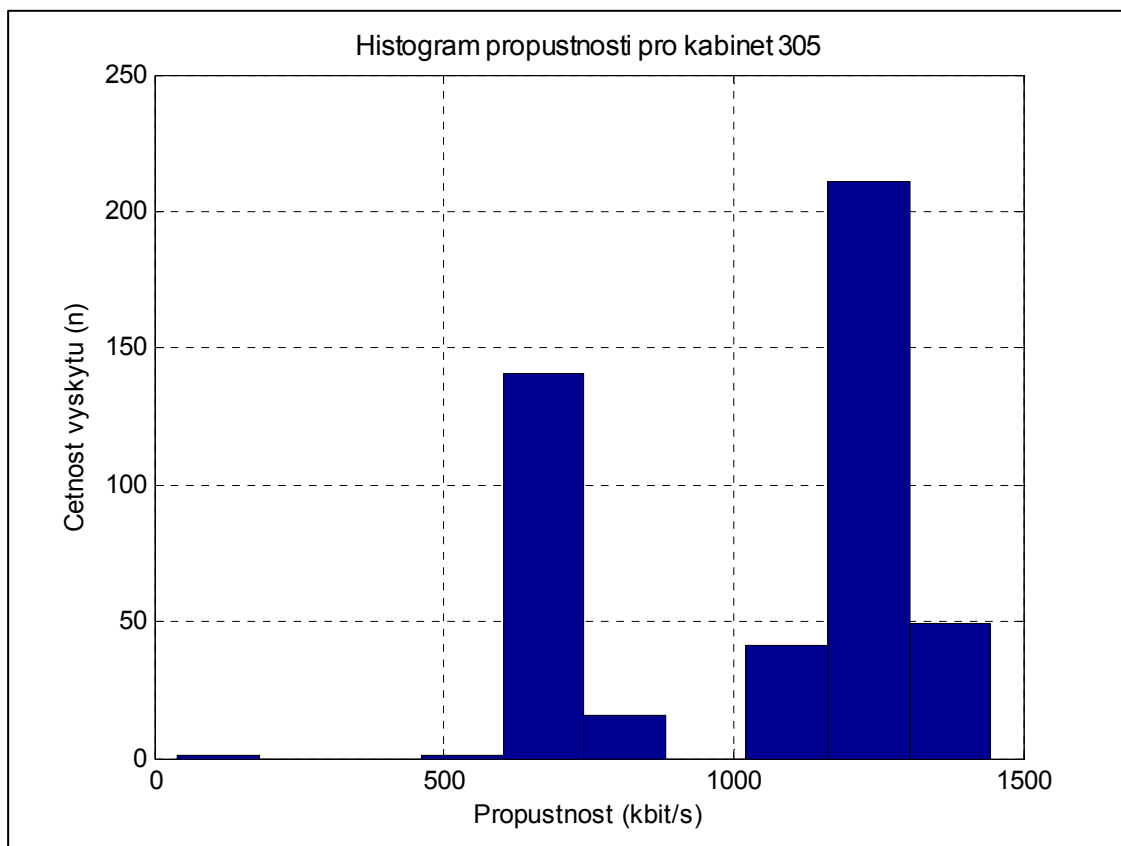
Obr. 7.4: Propustnost full duplex mezi učebnou 339 a 305

305.

Při tomto měření byl použit nástroj Iperf. Jedná se o měření založené na struktuře klient – server. V učebně 339 byl spuštěn na počítači skript zajišťující spuštění aplikace v roli serveru. Klientská aplikace byla zprovozněna na notebooku zapojeném v kabinetě 305.

Z vytvořené grafu je patrné že měření probíhalo dva dny od 16. do 18. dubna. Průměrná propustnost daného spoje odpovídala hodnotě 1 Mbit/s. Výchylka se objevuje na začátku kdy dochází k postupnému plnění operačních pamětí a inicializaci

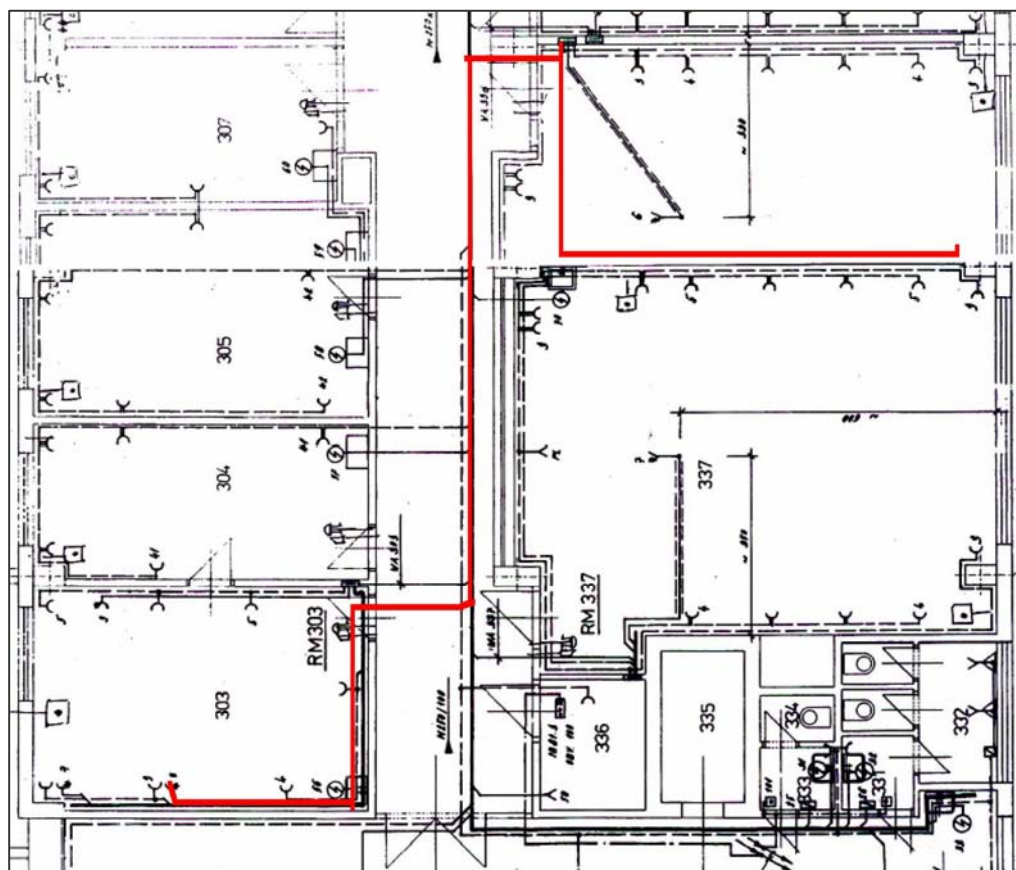
jednotlivých síťových zařízení. Mezi jednotlivými body lze najít určitou korelaci, kdy se první polovina bodů vyskytuje na hodnotách 1200 kbit/s a druhá na 700 kbit/s.



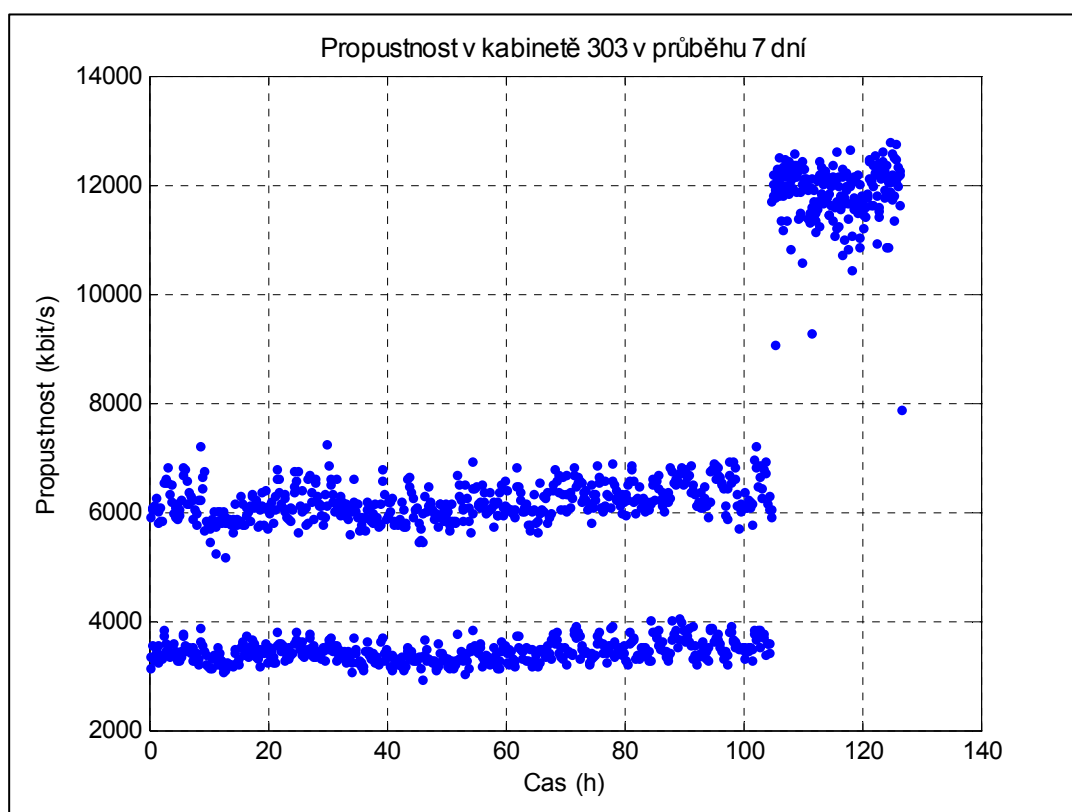
Obr. 7.5: Histogram propustnosti pro kabinet 305

Dalším sledovaným místem pro test byl kabinet 303. Měření bylo zapojeno stejně jako v předchozím případě. Měření započalo v pondělí 7.4.2008 a pokračovalo až do příštího týdne. Na zobrazeném grafu je patrné, že v pracovní dny se propustnost pohybuje na stálých hodnotách, v pátek však rapidně narůstá a dosahuje dvojnásobné hodnoty.

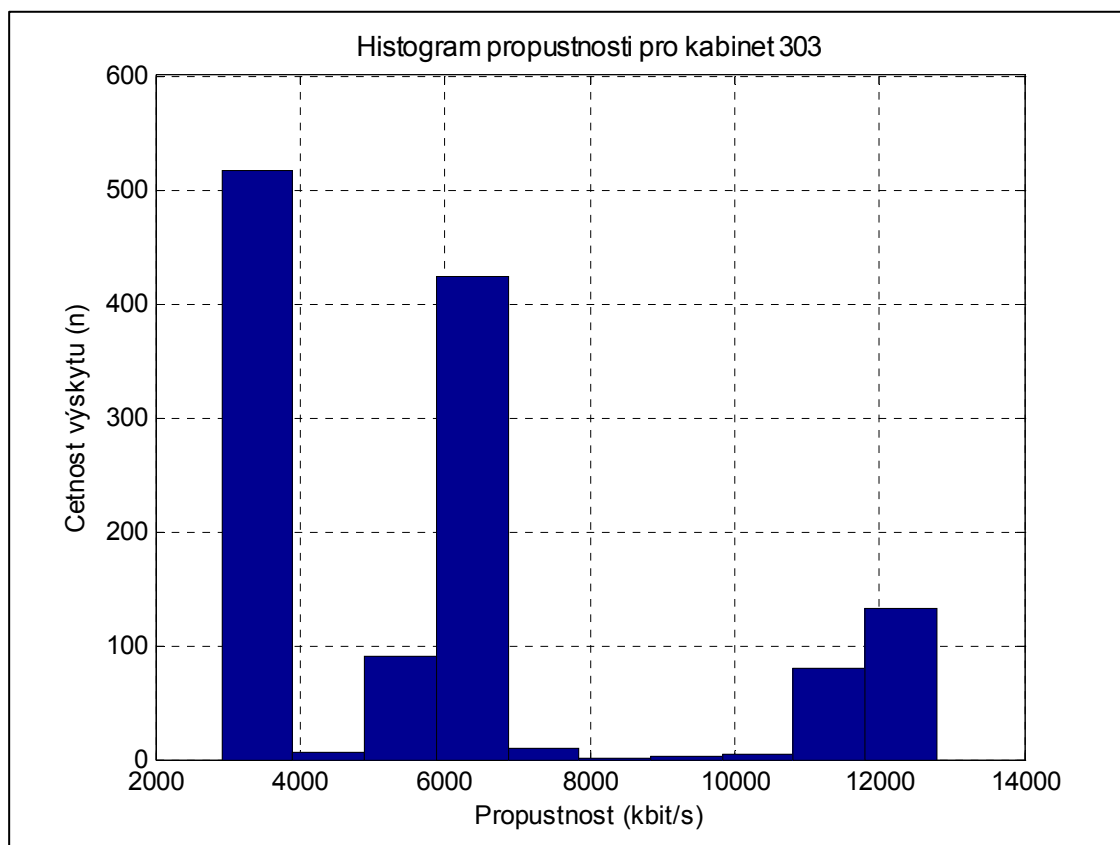
Z histogramu je patrné, že při daném měření se nejvíce hodnot propustnosti objevovalo na 3 a 6 Mbit/s. Nárůst na 12 Mbit/s ilustruje fakt proměnné charakteristiky média. Důsledným sledováním nebylo nalezeno objektivní vysvětlení nárůstu propustnosti. Předpokladem je změna charakteristiky sítě při provozu spotřebiče, který zaručuje pásmo a jeho následné vypnutí zapříčinilo nárůst propustnosti.



Obr. 7.6: Ilustrace sítě pro měření propustnosti mezi učebnou 339 a 303



Obr. 7.7: Propustnost full duplex mezi učebnou 339 a 305



Obr. 7.8: Histogram propustnosti

Zobrazené histogramy udávají četnost výskytu propustností. Histogram v rozsahu propustností $\langle 0, L-1 \rangle$ je tak diskrétní funkcí

$$h(C_k) = n_k, \quad (7.1)$$

pro $k = 0, 1, \dots, L-1$, kde C_k je k -tá úroveň propustnosti a n_k je počet propustností v daném časovém úseku s které mají hodnotu C_k .

Pro provedeném měření propustnosti je nutné provést testování nejistoty měření (uncertainty of measurement). Jedná se o parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině. Tímto parametrem může být např. směrodatná odchylka nebo její daný násobek. Pro jednotlivá měření tak byla stanovena střední kvadratická odchylka jednoho měření (výběrová směrodatná odchylka dle rovnice 7.2).

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7.2)$$

Pravděpodobnost, že odchylka nepřekročí hodnotu dvojnásobku standardní nejistoty závisí na rozdělení a při normálním rozdělení je to 95,5%, při trojúhelníkovém 96,6% a při rovnoměrném 100%. Pro normální rozložení, 95,5% a 10 hodnot je v tabulce kvantil rozložení hodnota 2,626. Tak lze podle vzorce (7.3) vyčíslit chyba výsledku neboli nejistota měření typu A z n měření s pravděpodobností P .

$$\delta(X) = t_n \cdot p \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (7.3)$$

Pro provedené měření propustnosti pro kabinet 305 je možné vypočítat nejistotu měření podle (7.4).

$$\delta(X) = 2,626 \cdot \frac{311,0726}{\sqrt{5}} = 365,3183 \text{ [kbit/s]} \quad (7.4)$$

Následná výsledná hodnota propustnosti pro kabinet 305 může být vyčíslena jako $C = 1053,32 \pm 365,3183 \text{ kbit/s}$. Podobným způsobem podle vzorce (7.5) lze dojít k výsledku pro kabinet 303. Hodnota propustnosti odpovídá $C = 5266,6 \pm 1454,31 \text{ kbit/s}$.

$$\delta(X) = 2,626 \cdot \frac{1238,3639}{\sqrt{5}} = 1454,3134 \text{ [kbit/s]} \quad (7.5)$$

Z daných grafů propustnosti je dále patrné, že propustnost se mění zásadním způsobem během dne. Tato změna může být popsána funkcí $f(x)$ podle vzorce (7.6) zobrazující charakteristiku propustnosti během dne.

$$f(x) = \text{abs}(a) * \sin(x + b) + c \quad (7.6)$$

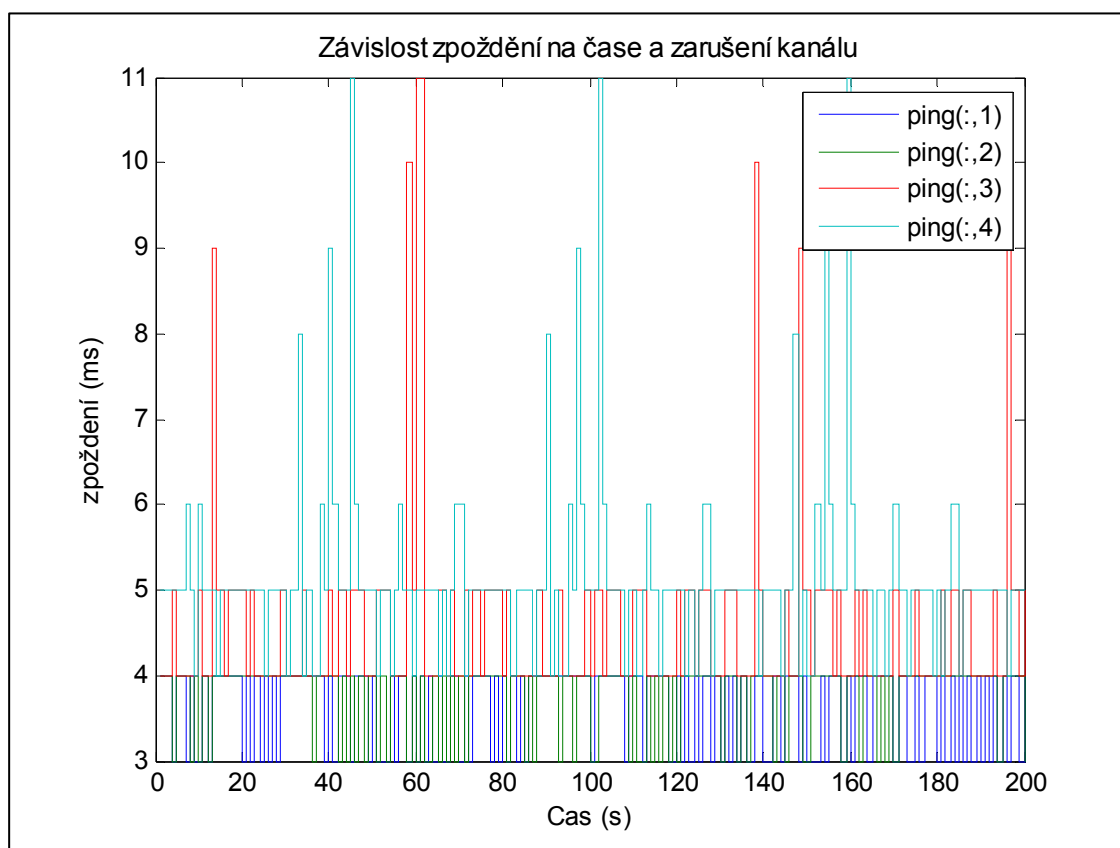
V tomto vztahu x značí denní čas v radiánech ($0 - 2\pi$), c je průměrná propustnost, a je standardní odchylka propustnosti a b je konstanta definovaná pro danou přenosovou trasu. Z tohoto důvodu lze proměnné a a c jednoduše zjistit výpočtem a konstantu b zjistit odhadem ze změřených dat [16].

7.2 Vyhodnocení zpoždění, jitteru a ztrátovosti

Měření zpoždění bylo provedeno pomocí nástroje ping, bylo tak zjištěno RTT zpoždění paketů v PLC síti pro různé druhy kanálů. PLC bylo nakonfigurováno tak aby přijímalo ICMP pakety stejné, jaké je možné nalézt u přenosů VoIP. Testovací nástroj byl spuštěn po dobu 15 minut, použitím délky paketů 32 B a 100 B. Čas mezi posíláním paketů byl 100 ms (9000 vzorků).

Z uložených vzorků byla zjištěna maximální, průměrné a minimální RTT.

Výsledný skript vypadal následovně *ping IP2 -n 100 -l length*.



Obr. 7.9: Změřené zpoždění

Byla změřena 4 různá zpoždění. Jednalo se o zpoždění kdy bylo přenášeno 32 a 100 B. Dalším parametrem bylo zarušení kanálu. První série (1. a 2. křivka) odpovídají nezarušenému kanálu při maximální dostupné propustnosti. Druhá série (3. a 4. křivka) jsou obrazem zpoždění pro síť s maximálním možným zarušením, kdy ještě bylo možné navázat spojení.

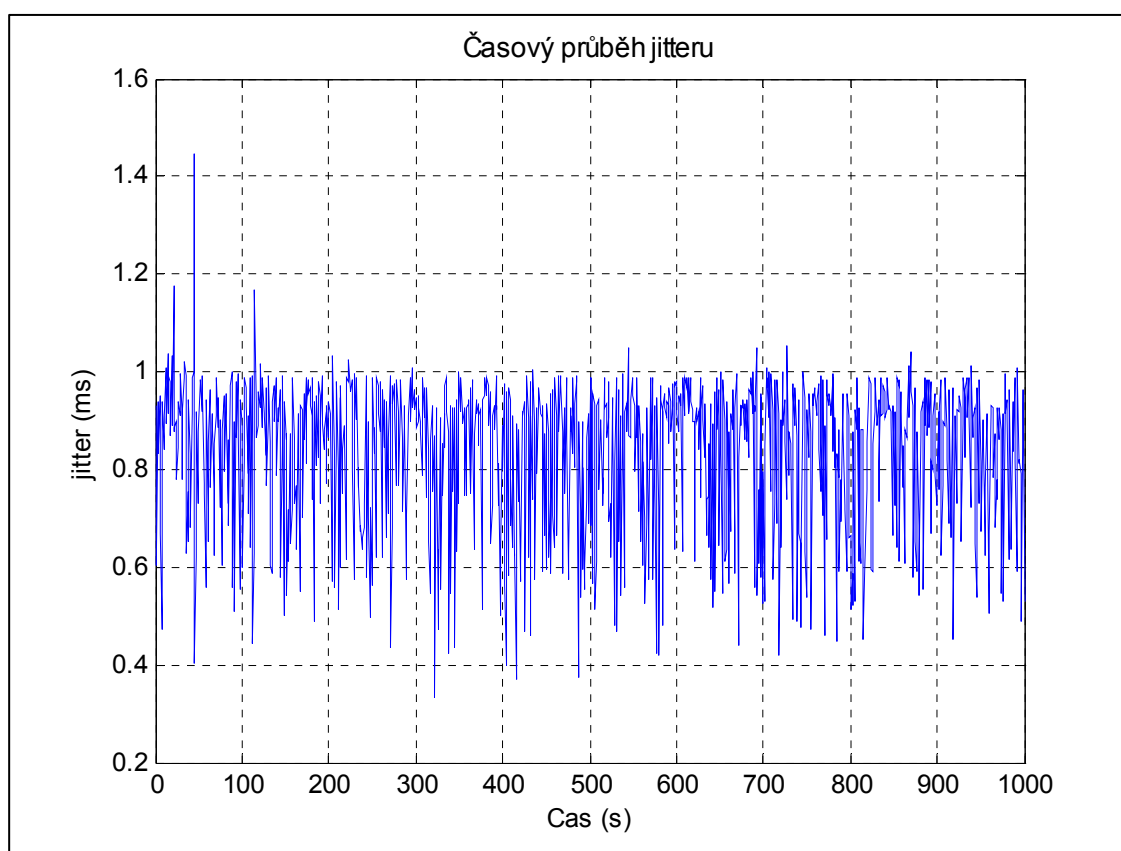
U nezarušeného kanálu se zpoždění s definovanou velikostí paketů pohybovalo na úrovni 3 – 4 ms. Při plném zarušení se průměrná hodnota přenesla na 4 – 5 ms. Docházelo však k vysokým, občasným skokům, kdy zpoždění dosahovalo až 11 ms.

Jitter neboli kolísání velikosti zpoždění paketů při průchodu sítí (vzniká např. na směrovačích (routerech) jako důsledek změn routování, chování interních front routeru atd.) Pro zjištění jitteru a ztrátovosti byl použit nástroj iperf s níže navrhnutým nastavením.

o Iperf -s -u

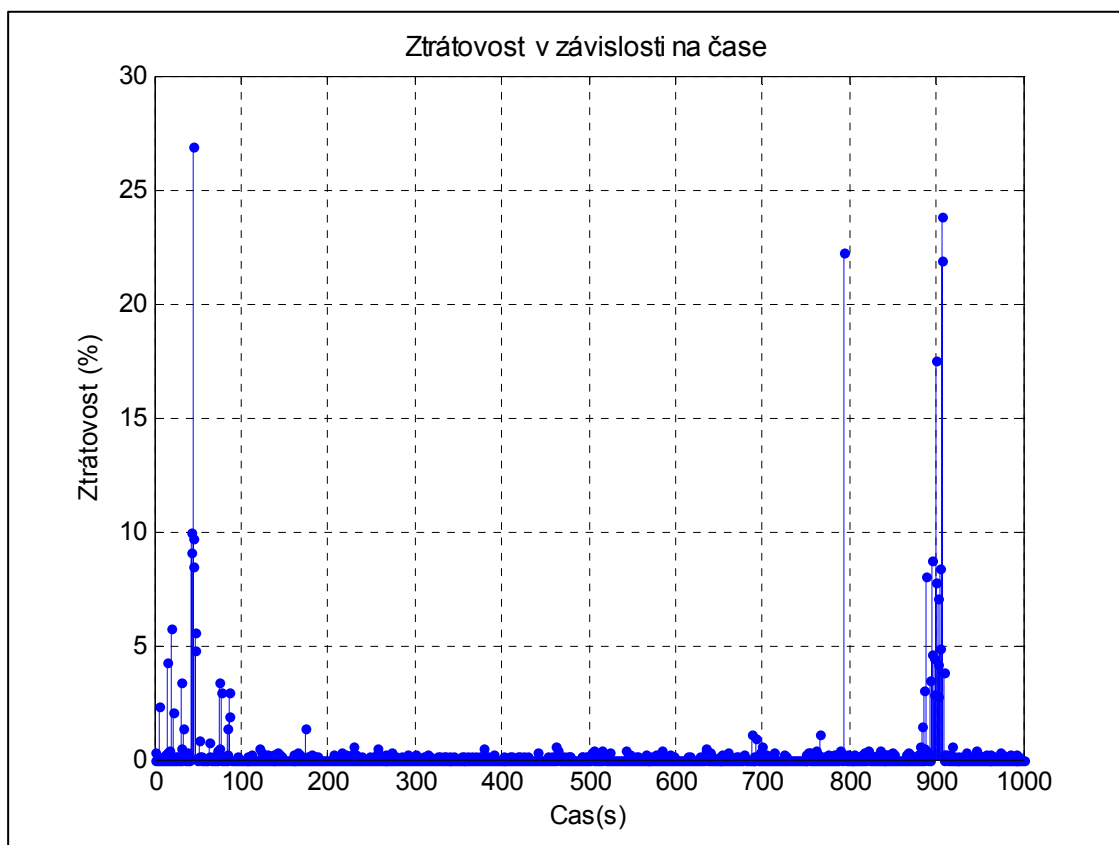
o Iperf -c IP1 -u -t 60 -l length -i1 -b max_bw

Příkaz poslal UDP pakety do počítače P1 s periodou 60 s. Délka paketů byla stanovena na 1472 bytů. Pro měření bylo nutné stanovit maximální šířku pásma, ta byla získána z měření propustnosti. Na straně serveru byl zobrazen jitter a procentní ztráta datagramů.



Obr. 7.10: Změřený jitter

Podle změřených parametrů se jitter dostává na maximální hodnotu 1,4 ms. V průměru dosahuje hodnoty 1 ms. Tento jitter je možné akceptovat. Z porovnání je tak zřejmé že daná technologie může být použita pro přenos VoIP hovorů a dalších služeb pracujících v reálném čase.



Obr. 7.11: Změřená ztrátovost

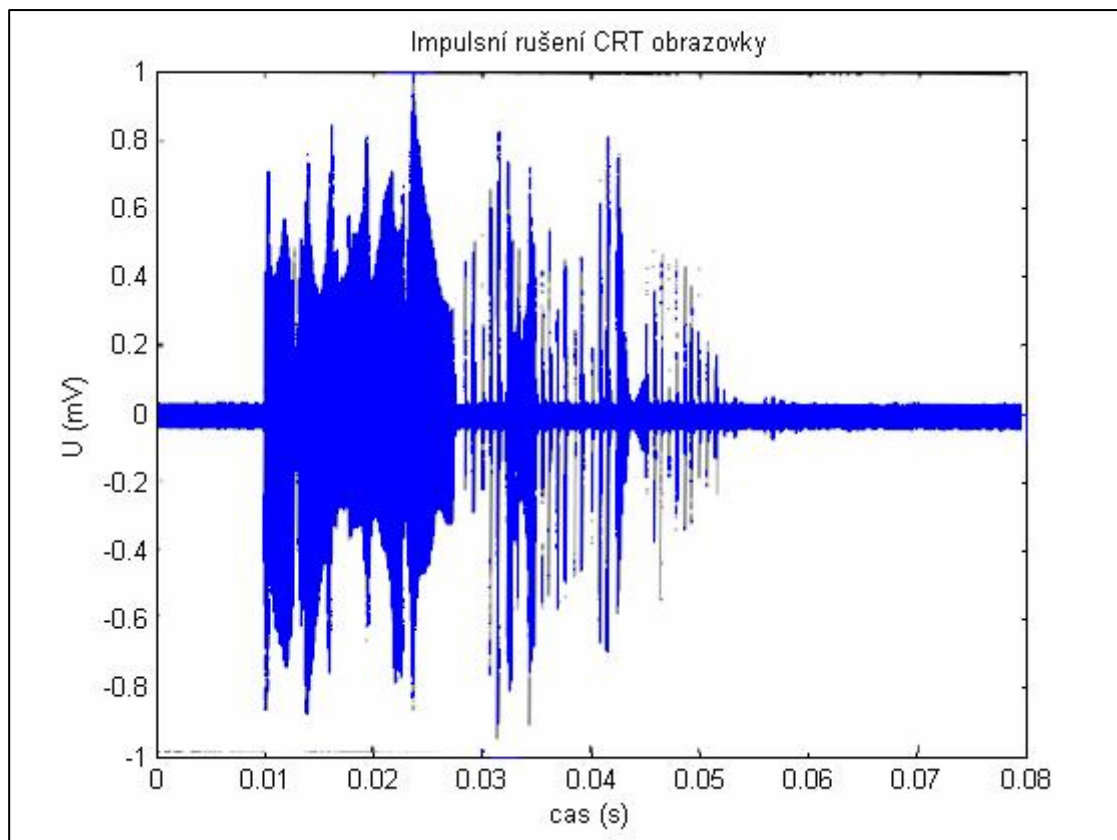
Pro danou trasu a zjištěnou maximální propustnost 11,5 Mbit/s byla změřena ztrátovost. Z tohoto je patrné, že ztrátovost dosahuje vysokých špiček. V daných časových okamžicích tak při přenosu dochází ke ztrátě datagramů. Pro nejvyšší hodnotu ztrátovosti 27% dochází z celkového počtu 931 ke ztrátě 250 datagramů. Průměrná ztrátovost se bez započtení špiček pohybuje na jednom procentu. Při průměru všech hodnot se dochází k hodnotě ztrátovosti 2,1 procent. V závislosti na tomto je nutné zvážit zda je možné tuto ztrátovost akceptovat.

7.3 Vyhodnocení monitorování kanálu

Elektrické vedení je sdíleno se spoustou zařízení, které mohou generovat šum (stálý, opakující se a impulsní). Impulsní šum je jeden z hlavních zdrojů interferencí, který způsobuje bitové chyby u PLC systémů. Jedná se především o spínané zdroje a další druhy zařízení připojených do sítě. Podle literatury lze toto rušení klasifikovat a určit jejich délku, šířku pásma. Pro zjištění těchto šumů jsou použity opravné kódy a potvrzování (ARQ). Ve skutečnosti však je ale jejich zjištění velice obtížné. Impulsní rušení obvykle trvá od několika μs do několika ms a v některých extrémních

podmínkách může dosáhnout sekund. Pro odstranění tohoto problému jsou navrženy opravy chyb a potvrzování.

U impulsního rušení nelze úplně odstranit vliv na frekvenční a amplitudovou charakteristiku. V případě dlouho trvajícího impulsu s velkou amplitudou je PSD soustředěno na malém počtu frekvencích tak, že rušení může být nedůležité. Jiný případ je u velmi krátkých impulsních šumů které mohou ovlivnit celý OFDM symbol.

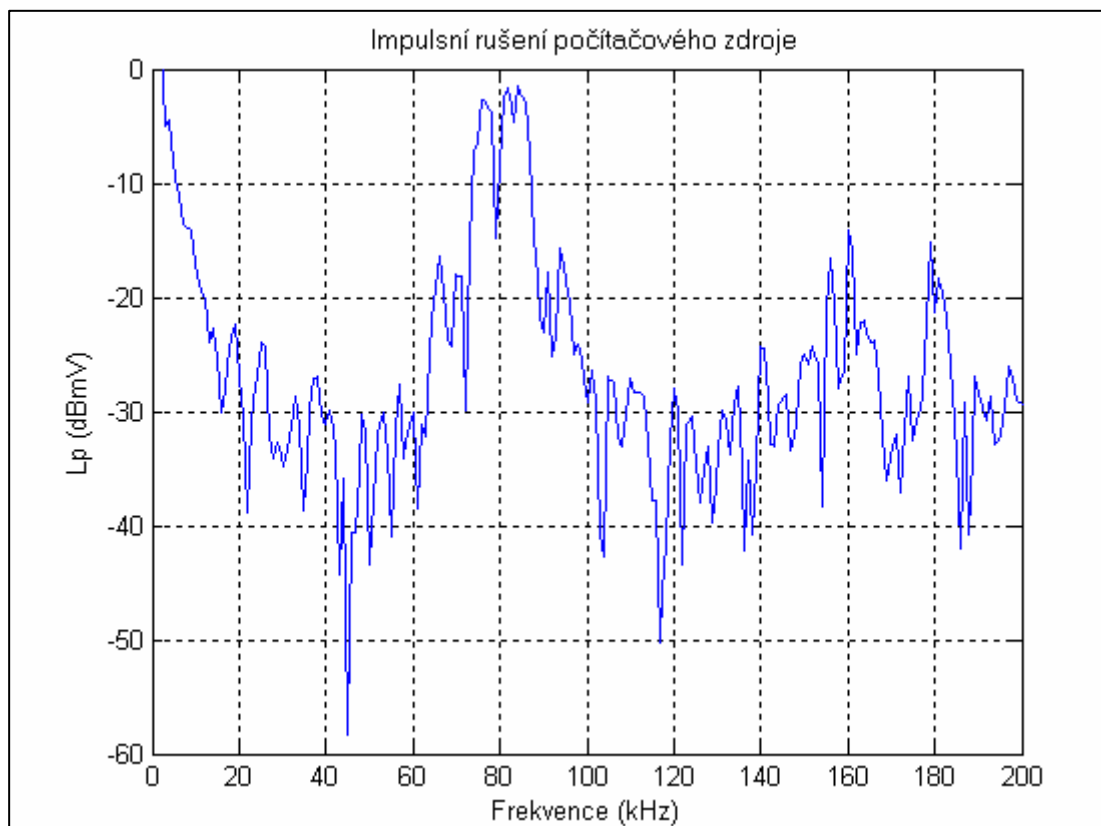


Obr. 7.12: Časový průběh impulsního rušení

Impulsní rušení lze rozčlenit do dvou kategorií.

- Asynchronní impulsní šum u kterého trvání kolísá od několika mikrosekund do několika milisekund a četnost výskytu je náhodná.
- Pseudostacionární periodické impulsní rušení synchronní s frekvencí sítě. (50 Hz)

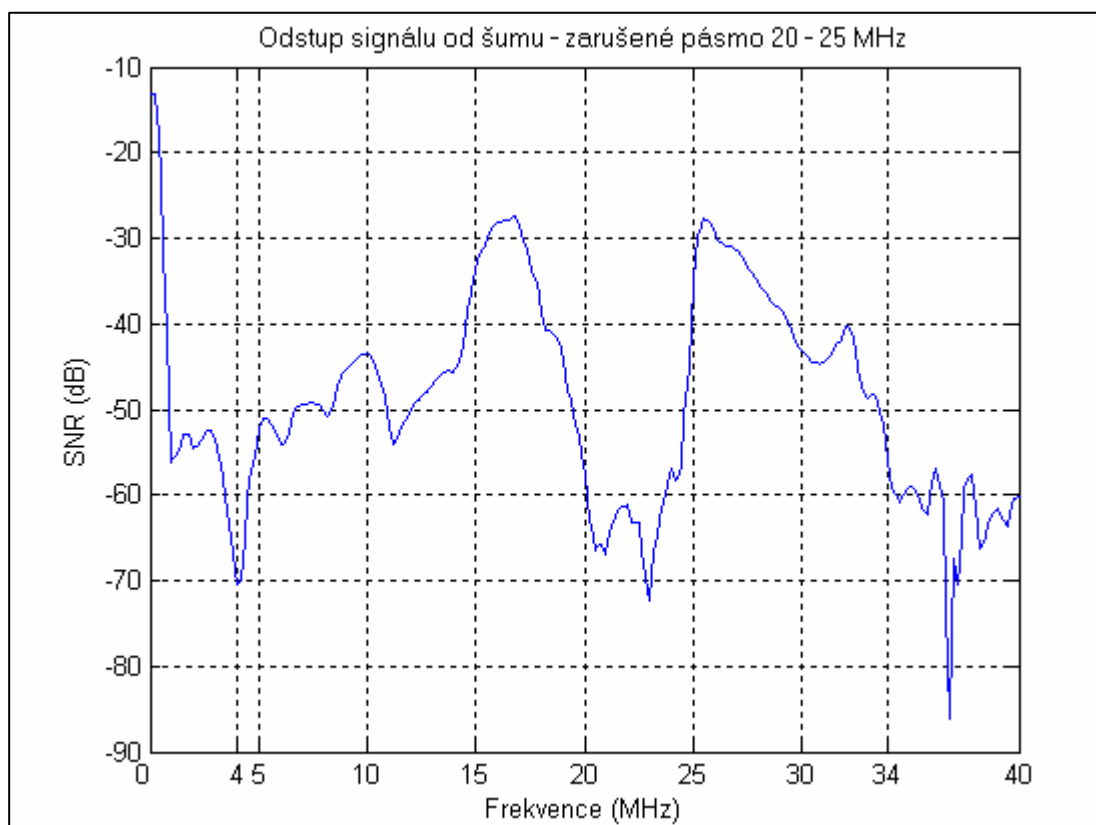
Pro ilustraci asynchronního impulsního rušení je zobrazen na obrázku 7.12 dle [15] průběh trvání impulsu generovaného počítačovou obrazovkou. Tento impuls trvá 50 ms a jeho energie je soustředěna na nízkých frekvencích.



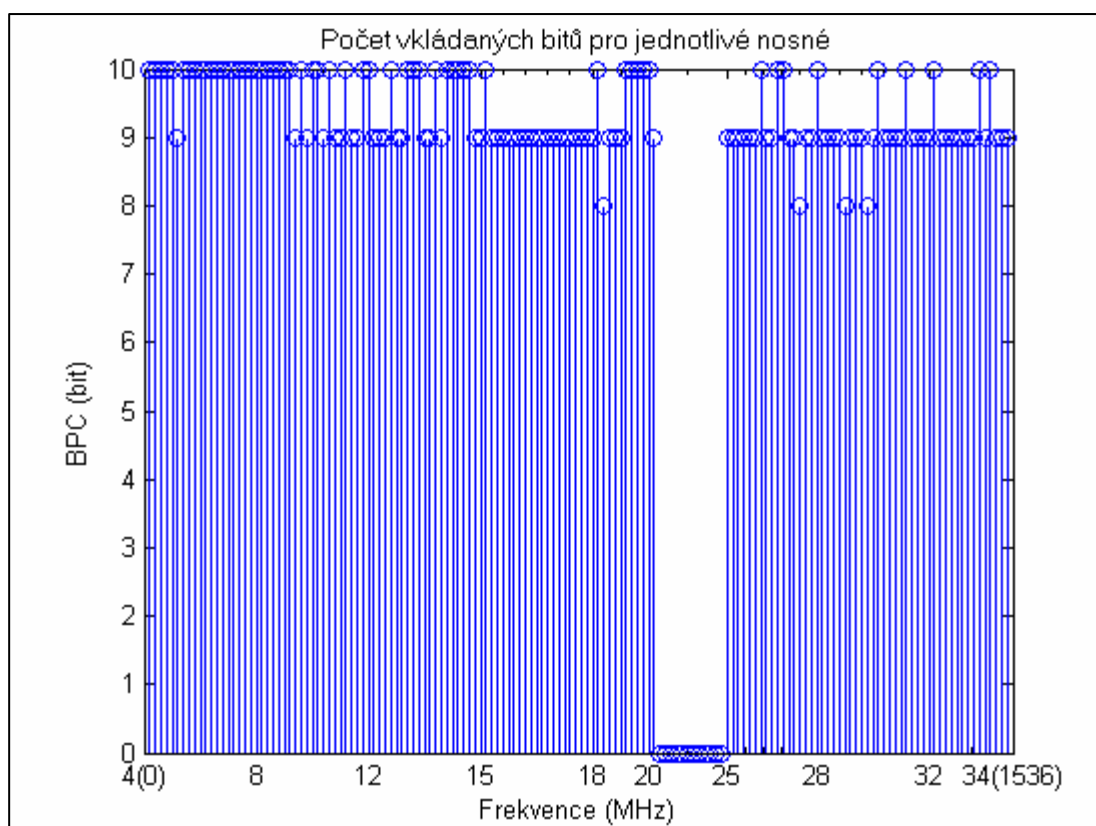
Obr. 7.13: Frekvenční průběh impulsního rušení pro PC zdroj

Existují techniky, které umožňují měření impulsního rušení. Jedná se především o dlouhodobé sledování kanálu a vyhodnocení jeho charakteristik na základě připojených či odpojených zařízení. Podobným měřením bylo nalezeno impulsní rušení při spuštění spínaného PC zdroje na frekvenci 80 kHz jak je zobrazeno na obrázku 7.13.

Popsaným způsobem nebylo nalezeno zařízení, které by v dostatečném rozsahu zarušilo širokopásmovou technologii přenosu po energetické síti. Byla proto navržena technika zarušení pomocí zařízení NMS. Zařízení NMS umožňuje selektivně vybrat pásmo, v kterém bude signál utlumen. Bylo proto provedeno utlumení frekvenčního rozsahu 20 až 25 MHz tak jak je naznačeno na Obrázku 7.14 a 7.15. Na prvním z těchto obrázků je vidět průběh frekvenčního spektra pro zvolený rozsah 4-34 MHz a na druhém stejné utlumené pásmo, kdy jednotlivé nosné nenesou žádnou informační hodnotu.

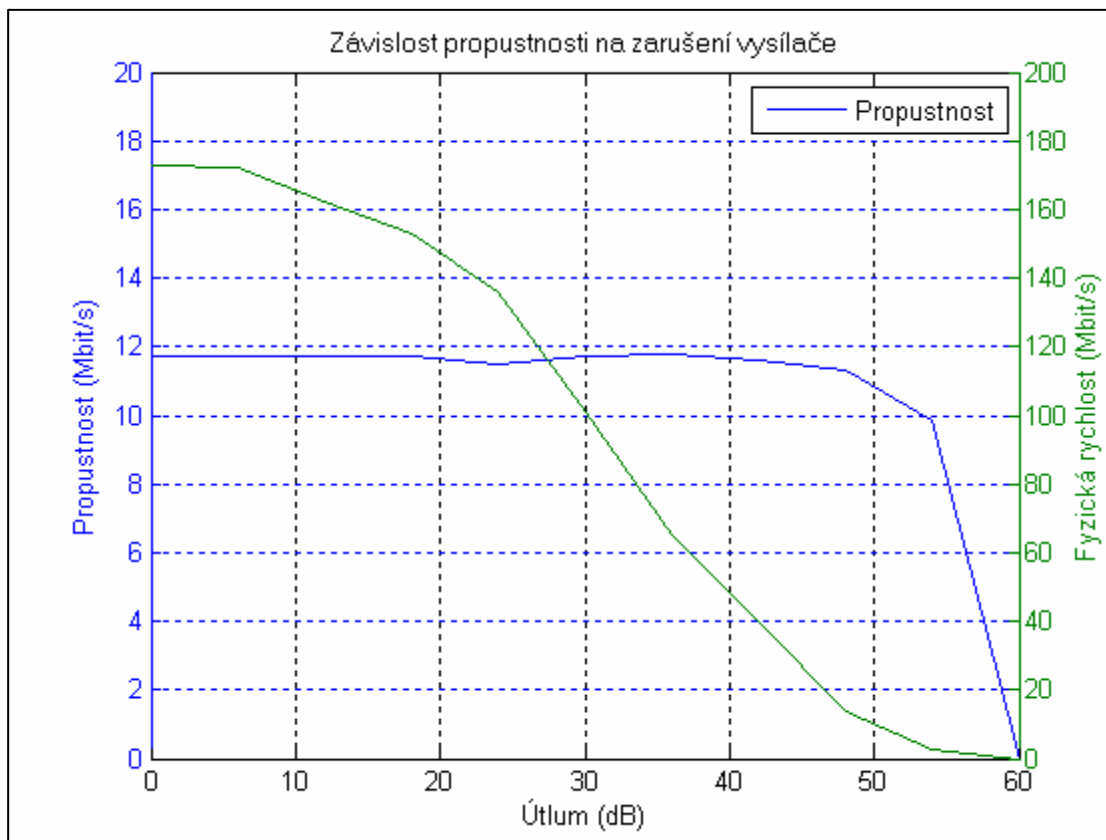


Obr. 7.14: Spektrum se zarušeným pásmem 20-25 MHz



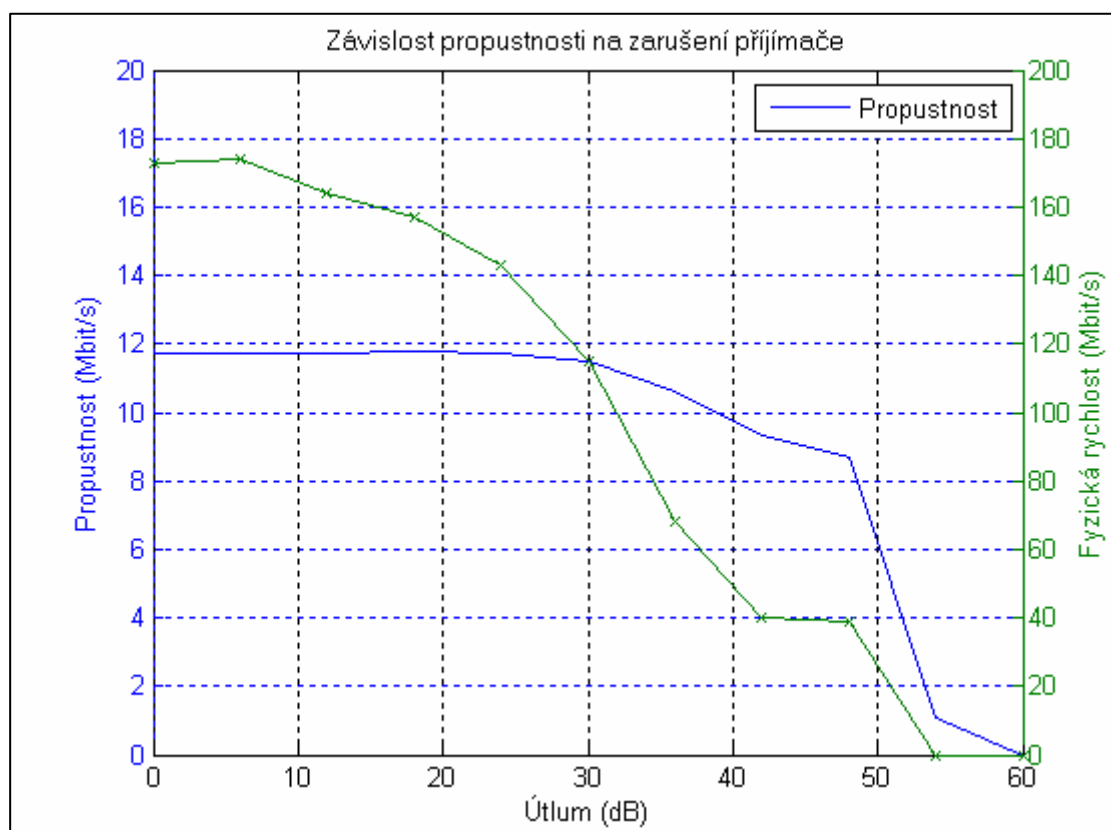
Obr. 7.15: Počet vkládaných bitů na nosnou s utlumeným rozsahem 20-25 MHz

V následném měření bylo provedeno vyhodnocení propustnosti a fyzické rychlosti na utlumení frekvenčního rozsahu. V tomto případě bylo utlumené celé pásmo od 4 do 34 MHz. Bylo postupně nastavována velikost útlumu od 0 do 60 dB a sledován vliv na fyzickou rychlost a na propustnost.

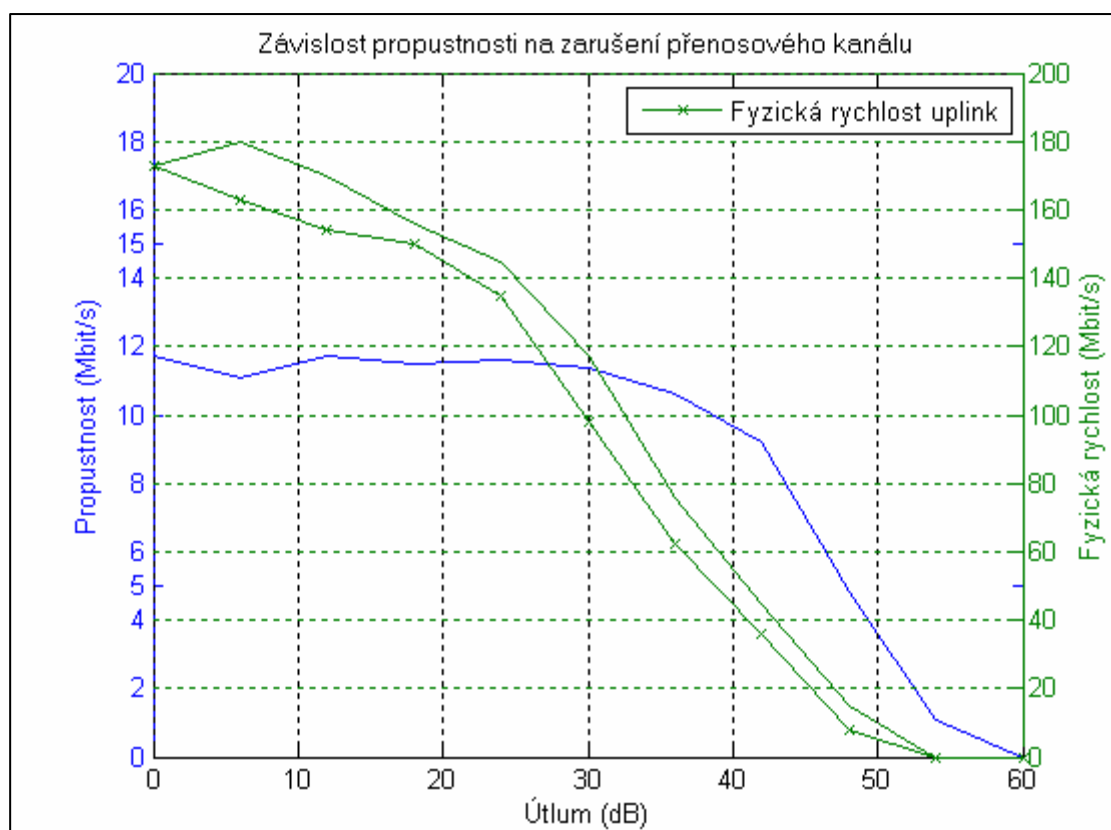


Obr. 7.16: Propustnost pro utlumený vysílač

Bylo sledováno selektivní utlumení přijímače a vysílače a jeho vliv na sledované parametry. Pokud se zvyšuje rušení u vysílače signálu, dochází k útlumu signálu, fyzická rychlost klesá logaritmicky. Propustnost z důvodu použití modulační techniky OFDM zůstává na stabilní hodnotě až do hodnoty útlumu 50 dB, kdy dochází k prudkému snížení. Při zarušení přijímače propustnost mírně klesá už od 30 dB. Přijímač je více citlivý na zarušení kanálu.



Obr. 7.17: Propustnost pro utlumený přijímač



Obr. 7.18: Propustnost pro utlumený přijímač i vysílač

Zaruší-li se celé vedení, klesá propustnost nejvíce. Je patrné, že fyzická rychlost ve směru vysílacím je menší než příjem. Z tohoto důvodu je nutné se vyhýbat takovým okruhům, kde se vyskytují zařízení vytvářející rušení. Zařízení, které působí narušení signálu mají největší dopad na kvalitu signálu v případě, kdy jsou blízko přijímacího PLC zařízení. V případě jeho odpojení je možné vidět nárůst propustnosti.

7.4 Vyhodnocení internetové telefonie

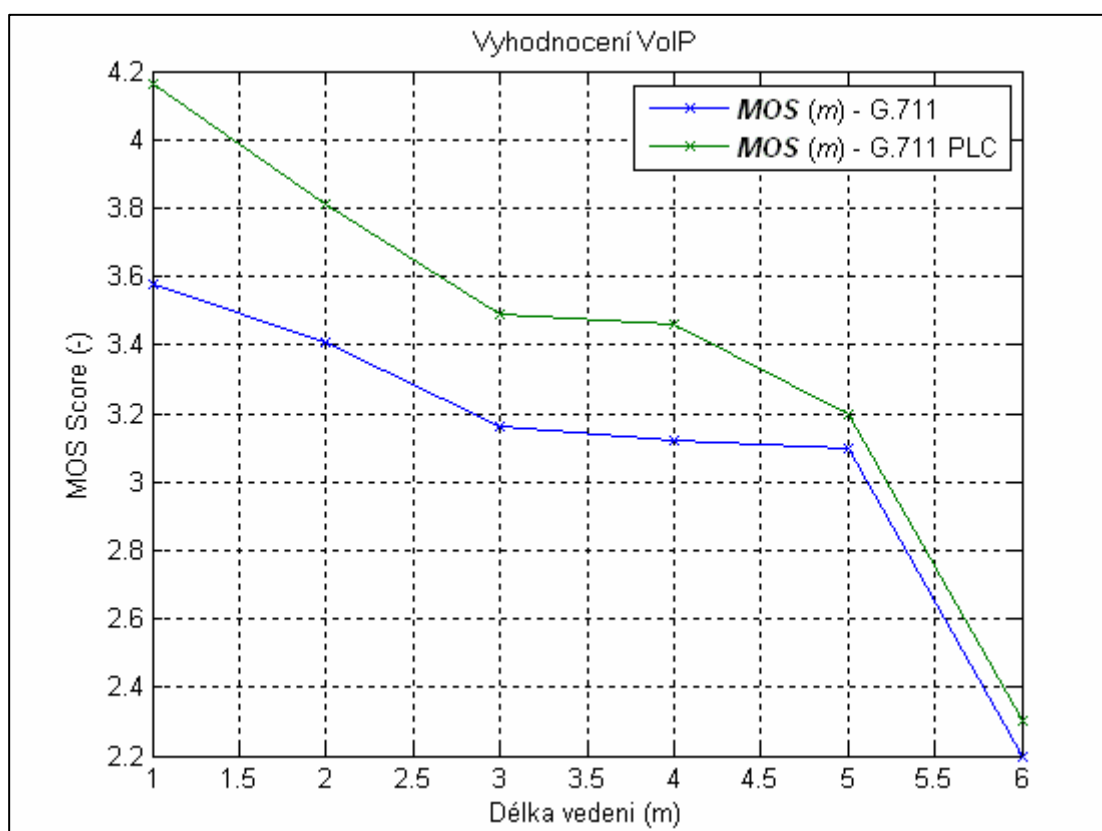
Změření parametrů VoIP bylo provedeno pomocí nástroje *PingSigmas's Traceroute*. Sledováno bylo především hodnocení MOS podle algoritmu PESQ. Dalším parametrem bylo číslo *Ie*, které zahrnuje vliv kodeku, jitteru, ztáty paketů a dále byl uveden *R* faktor, který spadá do rozsahu 0-100. Tento program podporuje 12 kodeků. Tento stav zobrazuje tabulka 7.3.

Typ kodeku	MOS	R	Ie
G.711	3,58	69,57	22,09
G.711 PLC	4,16	83,89	7,77
G.723.1 5.3k	3,31	64,14	27,52
G.723.1 6.3k	3,41	66,14	25,53
G.726 16k	2,54	49,35	42,31
G.726 24k	3,18	61,49	30,17
G.726 32k	3,61	70,36	21,30
G.726 40k	3,81	74,80	16,87
G.728 16k	3,49	67,69	23,97
G.729	3,56	69,17	22,25
G.729A	3,49	67,71	23,71
GSM FR(6.5)	3,16	61,12	30,54

Tab. 7. 3: Ohodnocení jednotlivých kodeků

Z tabulky je patrné, že klasický kodek G.711, který používá PCM modulaci dosahuje hodnocení MOS 3,58. Jedná se tedy o dobrou kvalitu přenosu, kdy je postřehnutelné zhoršení. Nejlepších výsledků dosahuje kodek G.711 PLC (Packet loss concealment) u kterého je maskován efekt ztráty paketů. Především se jedná o nahrazení ztraceného rámce nulou případně vhodným nahrazením ztracených dat dříve přijatými.

Pro objektivní vyhodnocení parametrů VoIP byla postupně měřena kvalita MOS v závislosti na odhadnuté délce elektrického vedení přes které signál putuje. Sledovanými kodeky byly zmíněné G.711 a G.711 PLC.



Obr. 7.19: Změřené parametry VoIP v závislosti na vzdálenosti

8. Závěr

Cílem práce bylo prostudovat a popsat technologii určenou pro vysokorychlostní datovou komunikaci po energetické síti se zaměřením na širokopásmové systémy komunikující po rozvodech nízkého napětí. Pomocí získaných poznatků měla být navržena laboratorní síť umožňující provádět zkušební měření demonstrující tento způsob komunikace. Následně měla být navrhována sada testů, které by umožnily zjišťovat přenosové parametry tohoto typu komunikace.

Pomocí dostupné literatury tak byla popsána technologie přenosu dat přes energetickou síť a bylo provedeno rozčlenění do odpovídajících kategorií s vysvětlením jednotlivých specifikací a charakteristik.

Poskytnutá zařízení byla popsána, uvedeny vlastnosti technologické specifikace a způsoby zapojení a způsoby jejich správy. Byla popsána správa, konfigurace a měření přes webové rozhraní na NMS zařízení a provedeno jednoduché rozčlenění do odpovídajících funkčních bloků odpovídající struktuře webových záložek.

Pro navrhnutou síť byla podrobně popsána metodika jednotlivých testů, které se opírají o dokumentaci „doporučení“ OPERA a také o níže uvedené publikované dokumenty. Dále byly popsány použité pomůcky při testech, jejich vlastnosti a ovládání.

Z měřených parametrů byla sledována především propustnost, fyzická rychlost a závislost na útlumu v médiu. Důležitým měřením bylo zjištění charakteristických vlastností přenosového kanálu, kdy byly sledovány šumové poměry na přenosovém kanálu, které slouží jako parametr pro nastavení optimální přenosové rychlosti. Do měření byla zahrnuto měření kvality internetové telefonie (VoIP) při použití PLC technologie.

Po měření propustnosti v rozsahu jednoho týdnu byla textová data zpracována do přehledných grafů a následně statisticky vyhodnocena. Z naměřených dat a vytvořených grafů bylo provedeno vyhodnocení celkového využití pro koncového uživatele.

Závislost propustnosti na útlumu v přenosovém kanále byla modelována pomocí měření, kdy bylo postupně utlumováno kmitočtové pásmo od 4 do 34 MHz. Následným sledováním bylo zjištěno, že útlum signálu v kanálu se projevuje až od 45 dB, kdy začíná propustnost postupně klesat.

Posouzením charakteristik zpoždění a ztrátovosti se došlo k závěru, že zpoždění dosahuje nízkých hodnot z důvodu malého počtu přepojovacích prvků v testovaném

měření. Ztrátovost dosahovalo v jistých maximálních hodnotách, průměrná hodnota však kolísala kolem 2 %, které jsou akceptovatelné i pro internetovou telefonii. Následným vyhodnocením přenosu IP telefonie bylo stanoveno mírné zhoršování kvality přenášeného zvuku v závislosti na vzdálenosti.

Naměřené výsledky z jednotlivých testů byly mezi sebou srovnány a vyhodnoceny a bylo určeno, že splňují požadovaná kritéria pro různé aplikace použití a bylo posouzeno, že je možné začlenit systém PLC do komunikačních sítí pro dosažení odpovídající QoS.

9. Použitá literatura

- [1] FEIBEL, W. Encyklopedie počítačových sítí, Computer Press, 1996, ISBN 80-85896-67-2.
- [2] KIRWAN, S., SOUTH, G. Power Line Networking Technologies Broadband Potential. Dostupné na <http://glasnost.itcarlow.ie/~net4/kirwans/bband.html>. 2003.
- [3] HRASNICA, H., HAIDINE, A., LEHNERT, R., Broadband Powerline Communications: Network Design, Wiley, 2004, ISBN: 978-0-470-85741-0
- [4] HELD, G., Understanding Broadband over Power Line, Taylor & Francis Group, LLC, 2006, ISBN 0-8493-9846-0
- [5] MARTÍNEZ, M., REILLO, S., Reference guide on the description of field trials and test procedures. Dostupné na www.ist-opera.org/drupal2/documents/OP_WP2_D11_1.6_M2_version.pdf
- [6] MARTÍNEZ, M., Preliminary results of the performed tests. Dostupné na www.ist-opera.org/drupal2/documents/performance_tests.doc
- [7] MARTÍNEZ, M., MIRAVELLES, J. S., D51. White Paper: Opera, Dostupné na www.ist-opera.org/drupal2/files/OP2_D51_White_Paper_Opera_Technology_v1.pdf
- [8] TORRES, L. M., IRANZO, S., MARTÍNEZ, M., OP2_D27_First draft of the OPERA specification version 2, Dostupné na www.ist-opera.org/drupal2/files/OP2_D27_First%20draft%20of%20the%20OPERA%20specification%20version%202.pdf
- [9] CURLEY, Ch., measuring network performance (throughput and bandwidth) Dostupné na <http://www.plug.org/pipermail/plug/2003-May/003920.html>
- [10] LEHMAN, M., Measuring throughput in a TCP/IP network. Dostupné na http://articles.techrepublic.com.com/5100-1035_11-1042973.html
- [11] DOSTALÍK, J., Technologie přenosu dat po elektrické síti systémem Defidev/DS2. Dostupné na <http://www.isdn.cz/clanek.php?cid=8733>

- [12] ANASTASIADOU, D.,ANTONAKOPOULO,Th., Broadband Communication in the indoor Power Line Envirenment: The pDSL Concept. Dostupné na <http://www.utko.feec.vutbr.cz/~zeman/PLC/rpaper44.pdf>
- [13] BURDA, K.,Bezpečná zpráva sítí. Dostupné na https://www.vutbr.cz/elearning/file.php/67447/MNSB_10.pdf
- [14] VRTÍLEK, M.,Testování aktivních síťových prvků. 2007. Bakalářská práce, FIT VUT. Dostupné na <http://www.fit.vutbr.cz/study/DP/rpfile.php?id=5454>
- [15] AVRIL, G.,TLITCH, M., Time/Frequency Analysis of Impulsive Noise on Powerline Channels . Dostupné na <http://www.springerlink.com/content/r47036x268j235lm/>
- [16] CONTRES,. L., LOGG, C, Throughput Time Series Patterns (Diurnal and Step Functions) <http://www.slac.stanford.edu/comp/net/pattern/diurnal.html>

10. Seznam obrázků

Obr. 2.1: Ilustrativní struktura sítě PLC.....	14
Obr. 2.2: Obecná struktura komunikačního rozhraní.....	15
Obr. 3.1: Blokové schéma technologie OFDM	19
Obr. 3.2: Ilustrace technologie OFDM	20
Obr. 4.1: Vrstvový referenční model dle organizace OPERA.....	25
Obr. 4.2: Schéma potvrzování paketů.....	28
Obr. 4.3: Šifrování dat a zajištění integrity u PLC technologie.....	29
Obr. 5.1: Síťové nastavení NMS.....	33
Obr. 5.2: Nastavení signálového módu v NMS	34
Obr. 5.3: Architektura PLC řídicího systému	35
Obr. 5.4: Místo protokolu SNMP v OSI.....	36
Obr. 5.5: Struktura databáze MIB.....	37
Obr. 5.6: Architektura NMS Serveru.....	38
Obr. 6.1: Zapojení laboratorní sítě.....	40
Obr. 6.2: Nastavení statické IP adresy	41
Obr. 6.3: Zapojená struktura přes webové rozhraní.....	41
Obr. 6.4: Program DS2Status pro zjištění přenosové rychlosti a charakteristiky BPC ..	47
Obr. 6.5: Zobrazení SNR	48
Obr. 7.1: Zapojení elektrické sítě v učebně PA-339.....	50
Obr. 7.2: Porovnání propustnosti zařízení různých výrobců	51
Obr. 7.3: Výstup propustnosti z programu Netperf	52
Obr. 7.4: Propustnost full duplex mezi učebnou 339 a 305.....	53
Obr. 7.5: Histogram propustnosti pro kabinet 305	54
Obr. 7.6: Ilustrace sítě pro měření propustnosti mezi učebnou 339 a 303.....	55
Obr. 7.7: Propustnost full duplex mezi učebnou 339 a 305.....	55
Obr. 7.8: Histogram propustnosti.....	56
Obr. 7.9: Změřené zpoždění.....	58
Obr. 7.10: Změřené jitter	59
Obr. 7.11: Změřená ztrátovost	60
Obr. 7.12: Časový průběh impulsního rušení	61
Obr. 7.13: Frekvenční průběh impulsního rušení pro PC zdroj.....	62
Obr. 7.14: Spektrum se zarušeným pásmem 20-25 MHz	63
Obr. 7.15: Počet vkládaných bitů na nosnou s utlumeným rozsahem 20-25 MHz.....	63
Obr. 7.16: Propustnost pro utlumený vysílač.....	64
Obr. 7.17: Propustnost pro utlumený přijímač.....	65
Obr. 7.18: Propustnost pro utlumený přijímač i vysílač	65
Obr. 7.19: Změřené parametry VoIP v závislosti na vzdálenosti	67

11. Seznam tabulek

Tab. 6. 1: Stupnice hodnocení MOS (MOS Score)	49
Tab. 7. 2: Propustnosti různých zařízení.....	51
Tab. 7. 3: Ohodnocení jednotlivých kodeků	66